

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**Ingeniería técnica industrial: Electrónica industrial
Proyecto fin de carrera**



***“ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN
ENERGÍAS RENOVABLES PARA PAÍSES EN VÍAS DE
DESARROLLO”***

AUTORA: GEMMA VILLANUEVA FERNÁNDEZ

TUTORA: M^a EUGENIA RABANÁL JIMÉNEZ

**Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e
Ingeniería Química.**

Índice

1.	Objetivos	7
2	Introducción	10
2.1	Las necesidades energéticas a nivel mundial.....	11
3	Introducción energías renovables.....	12
3.1	Caracterización de la energía	13
3.2	Fuentes de energías no renovables	13
3.3	Fuentes de energías renovables.....	13
3.4	La transformación de la energía.....	16
3.5	Energía disponible y energía primaria.....	16
3.6	Una justificación al estudio de las energías renovables.....	19
3.6.1	Generalidades	19
3.6.2	Necesidad por la demanda.....	20
3.6.3	Necesidad por el impacto.....	20
4	Energía solar	21
4.1	Antecedentes	23
4.2	La medición de la energía del sol: la constante solar.....	24
4.3	Distribución espectral de la radiación solar	24
4.4	La radiación solar terrestre	25
4.5	La captación térmica	27
5	Energía solar fotovoltaica.....	28
5.1	Introducción y generalidades.....	29
a.	El efecto fotoeléctrico	30
b.	El silicio: Elemento químico básico	31
5.2	Los semiconductores.....	34
5.3	Tipos de sistemas fotovoltaicos	37
5.3.1	Generalidades	37
5.3.2	Sistemas aislados.....	37
5.3.3	Sistemas fotovoltaicos conectados a la red	39
5.3.4	Centrales solares fotovoltaicas	40
5.3.5	Aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos	42
5.4	Los componentes de los sistemas fotovoltaicos	44
5.4.1	La célula solar	45

5.4.2	El panel fotovoltaico.....	56
5.4.3	El generador fotovoltaico.....	66
5.4.4	Las estructuras soporte	67
5.4.5	El inversor.....	70
5.4.6	La batería.....	71
5.4.7	El regulador de carga.....	75
5.4.8	Las pérdidas en el sistema fotovoltaico	76
5.4.9	Pérdidas por no cumplimiento de la potencia nominal.....	77
5.5	Cálculo de una instalación solar fotovoltaica.....	81
5.6	Fabricación de módulos solares fotovoltaicos.....	82
5.6.2	Proceso de fabricación de las células cristalinas.....	84
5.6.3	Proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos	85
6	Energía eólica	87
6.1	Generalidades	89
6.1.1	El aprovechamiento de la energía eólica y el viento.....	89
6.1.2	Obtención y tratamientos de datos de viento	90
6.1.3	Selección de emplazamientos	94
6.2	Aerogeneradores.....	99
6.2.1	Funcionamiento de un aerogenerador	99
6.2.2	Componentes de un aerogenerador	100
6.2.3	Cimentación	101
6.2.4	La torre	101
6.2.5	La góndola	102
6.2.6	El rotor.....	103
6.2.7	Materiales en energía eólica	105
6.3	Materiales compuestos.....	115
6.3.1	Definición de materiales compuestos.....	115
6.3.2	Clasificación de los materiales compuestos.....	117
6.3.3	Fibra de carbono	120
6.3.4	Resina poliéster.....	120
7	Situación de la energía en los países en vías de desarrollo	122
7.1	Energía solar en países en vías de desarrollo.....	124
7.2	Energía eólica en países en vías de desarrollo	125
8	Diseño de una instalación solar fotovoltaica	126

9	Presupuesto instalación energía solar fotovoltaica Angola. Alimentación estación de televisión	128
10	Conclusión	133
11	Bibliografía	137

Agradecimientos:

Por fin, la última página de este largo camino...

Es tanta la gente a la que debo agradecerle su apoyo... pero tengo que empezar por mis padres, que día a día, con mucho esfuerzo han hecho posible que este sueño se haga realidad. A mi hermano, un referente para mi, un modelo, gracias por estar ahí siempre que te he necesitado y por todos tus: "si se suspende no pasa nada, ya se aprobará", gracias, sin ti esto no hubiera terminado.

No puedo olvidar a mis compañeros de clase, Tamara, Almudena, Emilio, Cristina, Patricia y así un sinfín de compañeros y amigos. Nunca olvidaré nuestros descansos de clase, nuestros cafés, nuestras horas en la cafetería...

A vosotras, mis amigas de Aldea, ese maravilloso pueblo, Almudena, Elena, Rochi, Lidia, Blanca... muchas gracias por aguantarme en mis momentos de estrés y por hacerme sacar una sonrisa cuando lo estaba pasando tan mal. Por fin se acabo el sufrimiento chicas!

A mis compañeros de BTESA, muchos de vosotros ya no solo sois compañeros, sois amigos. No puedo nombraros a todos porque sino los agradecimientos serian más largos que el mismo proyecto, pero me tenéis que dejar que nombre a uno, gracias Alex, gracias por tu apoyo, por estar siempre cuando te he necesitado. GRACIAS.

Gracias a toda mi familia, tíos, primos y demás.

Gracias a todas esas personas que se van quedando en el camino, gracias por haberme apoyado en todo momento, de cada uno de vosotros he aprendido algo.

Y para terminar no me puedo olvidar de esa persona a la que le hubiera encantado ver que todo se ha acabado, ella ha visto muchas lágrimas, muchas horas de estudio, muchas alegrías cuando llegaba a casa con una aprobado, con un suspenso... no te imaginas la alegría que me daría que me vieras hoy, pero sé que allá donde estés, me estarás viendo. Esto va por ti abuela.

RESUMEN

En este proyecto, primero se realiza una pequeña introducción para que el lector adquiera unos conocimientos mínimos sobre las energías renovables.

Posteriormente, se describe los conceptos básicos de la energía solar fotovoltaica y los materiales usados en la misma. La energía solar fotovoltaica, es una transformación de la energía luminosa en energía eléctrica. El material más utilizado en la fabricación de los paneles solares es el silicio.

De igual forma, se describe conceptos básicos de la energía eólica y los materiales usados en la fabricación de los componentes que forman parte de este tipo de energía. En la energía eólica tiene lugar una transformación de la energía del viento en energía eléctrica. El elemento más importante es el aerogenerador, fabricado en materiales compuestos.

Por otro lado, se estudia la viabilidad de instalar estas energías en países en vías de desarrollo. Para ello, se ha realizado el estudio de un caso real: la alimentación de una estación de emisión de televisión en Angola. Se han comparado tres tipos de energía: energía solar, energía eólica y energía convencional. Se ha hecho una comparación de las estimaciones presupuestarias y de las ventajas e inconvenientes de estas tres fuentes de energía, llegando a la conclusión de que la mejor elección será realizar una instalación de energía solar fotovoltaica.

ABSTRACT

In this project, first of all, a small introduction about the renewable energy is done.

After that, basic concepts about solar photovoltaic energy and materials are depicted. The solar photovoltaic energy is a transformation from the light energy to the power energy; this transformation. The material used is silicon.

In the same way, there is the same description about the wind energy. This kind of energy is a transformation from wind energy to power energy. The main component is the turbine, manufactured with composites.

All this has been applied in a real case in order to study the viability of install renewable energy in developing countries, like Angola. Three types of energy have been compared: solar photovoltaic, wind energy and conventional energy. In the three suppositions, the budgets have been compared along the advantages and disadvantages of each one coming to the conclusion that the best choice is to a solar photovoltaic installation.

1. Objetivos

Los objetivos principales de este proyecto son:

1. Estudio de la definición de las energías renovables.
2. Se realizará una pequeña explicación de las más importantes o más utilizadas, y posteriormente una mejor explicación de las posibles energías utilizadas para la aplicación de estas en un ejemplo real.
3. Se estudiarán los nuevos materiales desarrollados que forman los distintos componentes en la energía solar fotovoltaica y energía eólica.
4. Estudio de la viabilidad de la aplicación de las energías renovables en los países en vías de desarrollo.

2 Introducción

2.1 Las necesidades energéticas a nivel mundial

En realidad no existe un problema de falta de recursos energéticos. Una parte del problema energético actual consiste en que la sociedad se ha hecho dependiente de un solo recurso: los hidrocarburos. Se ha rezagado el desarrollo tecnológico, y por tanto, la viabilidad económica de algunas otras alternativas energéticas.

Las energías renovables se convierten en una de las alternativas más interesantes para nuestra sociedad, por disponer de un enorme potencial en España y, al mismo tiempo, ser muy poco agresivas con el medio ambiente.

No es la única alternativa: y en muchos casos no es la mejor, o no es la más económica, pero existen ciertas aplicaciones actuales y otras potenciales. De esa forma se ahorran fuentes de energía convencionales, se alarga su duración y se disminuye el impacto medioambiental que implica su utilización.

La crisis energética mundial producida por todos los factores relacionados con los combustibles fósiles incide de forma especial en Europa que no cuenta con recursos energéticos propios para subsistir, dependiendo necesariamente de terceros países para satisfacer su demanda energética.

Las economías emergentes serán las responsables del crecimiento proyectado en el consumo de energía dentro del mercado en las dos próximas décadas.

Las tendencias indican que el consumo de energía por sector puede estar sometido al ritmo de desarrollo económico por región.

3 Introducción energías renovables

3.1 Caracterización de la energía

Se puede definir la energía como algo que no se puede ver, no se puede tocar, no se puede pensar, no ocupa lugar. La energía es una propiedad que se encuentra asociada a los sistemas materiales.

Gracias a esta propiedad los cuerpos tienen capacidad para producir cambios en otros cuerpos o en ellos mismos.

No se puede olvidar la “energía eléctrica”, asociada al movimiento de las cargas eléctricas a través de un circuito. La cantidad de energía eléctrica depende de la intensidad de corriente, el voltaje y el tiempo que esté pasando la corriente por un determinado aparato eléctrico.

La capacidad para producir cambios en la energía se manifiesta de muchas formas ya que dicha energía puede tener diferentes orígenes, desde los que se busca llegar a diferentes estados finales.

Se clasifica normalmente los distintos tipos de energía según cuál sea su origen.

- Fuentes de energías no renovables
- Fuentes de energías renovables

3.2 Fuentes de energías no renovables

Se define usualmente como fuente de energía no renovable a aquella que está almacenada en cantidades inicialmente fijas. A medida que se consume un recurso no renovable, se va agotando.

Dentro de las fuentes de energía no renovables, comúnmente se distingue principalmente entre tres tipos:

- a. Las fuentes de energía fósiles.
- b. Las fuentes de energías geotérmicas.
- c. La energía nuclear.

3.3 Fuentes de energías renovables

Se llama fuente de energía renovable a aquella que, administrada en forma adecuada puede explotarse ilimitadamente, su cantidad disponible no disminuye a medida que se aprovecha.

La totalidad de las energías renovables derivan directa o indirectamente de la energía solar. Directamente en el caso de la luz y el calor producidos por la radiación solar, e indirectamente en el caso de las energías eólica, hidráulica, mareas, olas y

biomasa, entre otras. Las energías renovables, a lo largo de la historia y hasta bien entrado el siglo XIX, han cubierto la práctica totalidad de las necesidades energéticas del hombre.

Los métodos de aprovechamiento de la energía solar de forma directa, utilizando la tecnología disponible, tratan de emular lo que la naturaleza realiza desde hace millones de años: “Transformar la energía electromagnética irradiada por el Sol en otras formas de energía.”

Las energías renovables son, junto con el ahorro la eficiencia energética, la llave para un futuro energético limpio, eficaz, seguro y autónomo.

Bajo la denominación de energías renovables, alternativas o blandas, se engloban una serie de fuentes energéticas que a veces no son nuevas, como la leña o las centrales hidroeléctricas, ni renovables en sentido estricto y que no siempre se utilizan de forma blanda o descentralizada.

El concepto de “energías renovables” excluye fuentes de energía como el carbón, el petróleo, el gas natural, y la energía nuclear, las más empleadas en la actualidad, y también las más contaminantes.

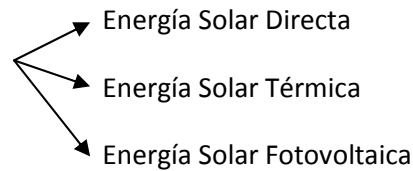
Las principales características del proyecto son:

- Beneficios medio ambientales: las tecnologías de las energías renovables provocan menores impactos medio ambientales y emisiones contaminantes, que las energías convencionales.
- Energía para el futuro: Las energías renovables, como su nombre indica, no desaparecerán nunca –viento, sol, agua- otras fuentes de energía son finitas y algún día se agotarán.
- Impulsa el empleo y la economía regional: Las inversiones en proyectos de energía renovables utilizan materiales y recursos humanos para construir y mantener las instalaciones, en lugar de importar los recursos energéticos costosos. La economía regional, y el propio municipio se benefician, al generar empleo, recursos económicos y proveer de suministro energético local en vez de que este desarrollo se realice en las regiones exportadoras de energía.
- Seguridad energética, al aumentar el uso de fuentes renovables disminuye la dependencia energética en los países exportadores de energía.

Las principales fuentes de energía son:

a. Energía solar

La energía solar, está constituida simplemente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra.



b. Energía Eólica

Es la energía que se extrae del viento. Es derivada de la energía solar, porque una parte de los movimientos del aire atmosférico se debe al calentamiento causado por el Sol.

c. Energía de la Biomasa

La forma más antigua de aprovechamiento de la energía solar. A partir de la metamorfosis pueden utilizarse la energía solar para producir sustancias con alto contenido energético como el alcohol y el metano.

d. Diferencia de Temperatura Oceánica

Se ha propuesto utilizar la diferencia de temperatura que existe entre la superficie del océano y la correspondiente a unas docenas de metros debajo de la superficie, para proporcionar los flujos de calor que impulsen un ciclo termodinámico y pueden producir otras formas de energía.

e. Energía de las olas

Se ha propuesto aprovechar, en ciertos lugares privilegiados, el vaivén de las olas del mar para generar energía eléctrica. Las olas son producidas por el efecto del viento sobre el agua. También es una forma derivada de la energía solar.

f. Energía Hidráulica

Esta energía es la que se obtiene a partir de caídas de aguas artificiales o naturales. Se construyen presas en los lugares con una combinación de gasto anual de agua y condiciones orográficas adecuadas. También esta es una forma de energía derivada de la energía solar, porque el sol provee la fuerza impulsora del ciclo hidrológico. Tradicionalmente se ha considerado como una forma de energía aparte.

g. Energía de las Mareas

En algunas regiones costeras se dan unas mareas especialmente altas y bajas. En estos lugares se ha propuesto construir grandes represas costeras que permitirían generar energía eléctrica con

grandes volúmenes de agua aunque con pequeñas diferencias de altura.

3.4 La transformación de la energía.

Un hecho importante respecto a la energía es su transformación. La energía asociada a un sistema puede aumentar o disminuir en él cuando se realiza un cambio.

Es necesario hablar desde el punto de vista físico del trabajo y del calor. Para que la energía se transfiera entre los sistemas estos deben interaccionar entre sí. Cuando la interacción es de tipo mecánico, mediante la actuación de una fuerza, la transferencia de energía entre un cuerpo y otro se denomina trabajo. Mientras se realiza trabajo sobre un cuerpo, se produce una transferencia de energía al mismo, por lo que puede decirse que el trabajo es energía en tránsito.

El calor interviene cuando dos cuerpos o sistemas que se encuentran a distintas temperaturas interaccionan. La energía se transfiere desde el cuerpo caliente al frío y esa transferencia de energía se denomina calor. Se puede decir que el calor es energía en tránsito, fluye de una zona de mayor temperatura a otra de menor temperatura, con lo que eleva la temperatura de la segunda y reduce la de la primera.

Hay situaciones en que esto no es así y se pueden producir pérdidas, de modo que existe un proceso en el que se parte la energía de que se dispone originalmente, que se encuentra en un estado en que no puede ser utilizados para su uso, y se llega a un estado en el que puede ser consumida, pero en una menor cantidad.

Consideremos que esta transformación, considerada como el proceso de explotación de una fuente de energía, se compone de una serie de pasos, más o menos complejos, entre los que pueden considerarse:

- a. Extracción del combustible.
- b. Transporte del combustible en bruto.
- c. Procesamiento del combustible hasta convertirlo en un producto susceptible de ser usado en una central, transformaciones o conversiones en diferentes formas de energía.
- d. Transporte de la energía producida hasta los consumidores
- e. Uso final de la energía.

3.5 Energía disponible y energía primaria

A grandes rasgos, se consideran dos tipos de energías, según cuál sea la forma en que pueden emplearse por parte del usuario o receptor de la misma. Existen fuentes de energía que facilitan su aplicación de modo directo y fuentes que necesitan

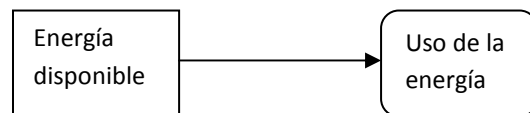
de una transformación para su utilización, de modo que su modo de aplicaciones es indirecto.

Se distinguen entre:

- Energía primaria, se encuentra lista para ser quemada en una central, tales como el carbón, petróleo, gas, nuclear, renovables.
- Energía disponible, se encuentra a disposición del usuario final y pueden ser: sólida (carbón, madera), líquida (petróleo, biocombustibles), gaseosa (gas combustible, aire comprimido), electricidad, calor (calefacción central)

En términos de aplicaciones tendremos a aquellos recursos naturales disponibles en forma directa (como la energía hidráulica, eólica y solar) o indirecta (después de atravesar por un proceso minero, como por ejemplo el petróleo, el gas natural, el carbón mineral, etc....) para su uso energético sin necesidad de someterlos a un proceso de transformación.ⁱ

Aplicación directa:



Aplicación indirecta:

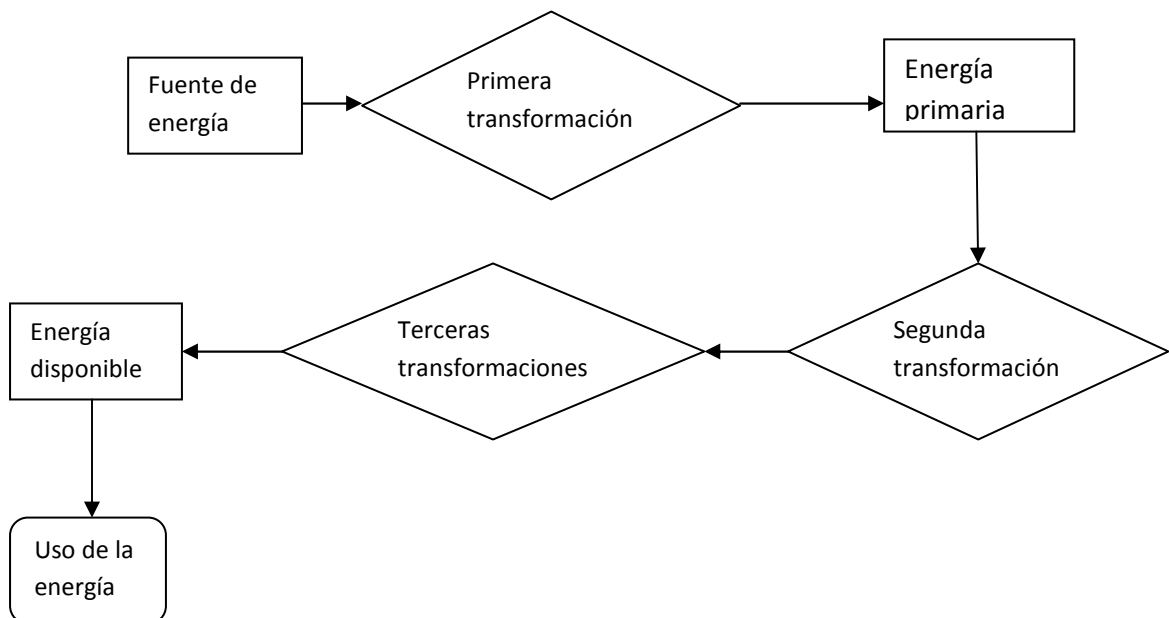


Figura 1 Energía primaria y Energía Disponible

Pueden considerarse la definición de energía secundaria como aquella resultante de las transformaciones o elaboración de recursos energéticos naturales (primarios) o en determinados casos a partir de otra fuente energética ya elaborada (por ejemplo en el caso de residuos del petróleo tal y como ocurre con el Alquitrán)

El único origen posible de toda la energía secundaria es un centro de transformación y, el único destino posible un centro de consumo, este proceso de transformación puede ser físico, químico o bioquímico modificándose así sus características iniciales.

Son fuentes energéticas secundarias: la electricidad, toda la amplia gama de derivados del petróleo, el carbón mineral, y el gas manufacturado. El grupo de los derivados del petróleo incluye a su vez una amplia variedad de productos energéticos útiles que se obtienen a partir del procesamiento del petróleo en las refinerías, entre los cuales se encuentran las gasolinas, los combustibles diesel y otros.

Si consideramos el proceso de transformación de las fuentes de energía desde el punto de vista de la entrega final de la misma, llegaremos a que la misma acaba teniendo que ser transformada en Energía mecánica o Energía Eléctrica.i

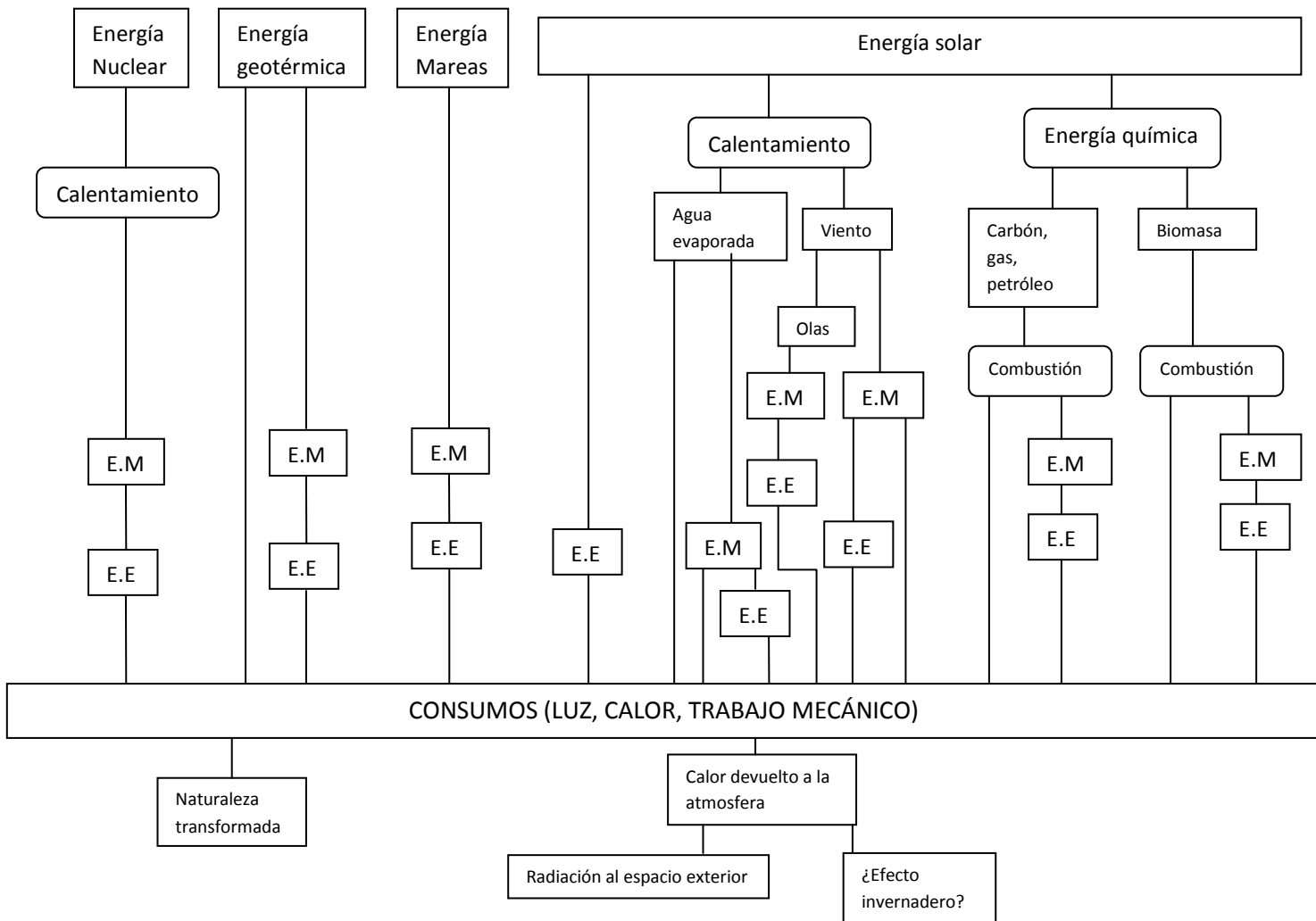


Figura 2 El proceso completo de la transformación de la energía, según su origen.

A su vez esta energía acaba siendo devuelta a la naturaleza. Puede entenderse que la totalidad de la energía existente en el origen acaba de un modo u otra devuelta a la naturaleza si consideramos el proceso completo que incluye tanto la transformación como la utilización de la energía.

3.6 Una justificación al estudio de las energías renovables

3.6.1 Generalidades

Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica. La navegación a velaⁱ, los molinos de viento^j o de agua y las disposiciones

constructivas de los edificios¹ más atrás para aprovechar la del sol, son buenos ejemplos de ello.

3.6.2 Necesidad por la demanda

La disponibilidad de recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo tecnológico. Es dicho desarrollo tecnológico el que acaba determinando la utilización de ciertos tipos de energía y la disponibilidad de ese recurso. Estos recursos energéticos son usados por el hombre con objeto de satisfacer algunas de sus necesidades, en la mayoría de los casos en forma de calor y trabajo.

En lo que se refiere a calor, es necesario para un gran número de aplicaciones. Respecto del trabajo, se utiliza para una gran variedad de procesos en lo que hay que vencer fuerzas de oposición.

Calor y trabajo, son dos necesidades básicas en cualquier grupo humano, independientemente de su nivel social, económico o tecnológico. Para producirlos, el hombre ha utilizado, a lo largo de la historia, una gran variedad de recursos energéticos.

Las fuentes de energía renovable son distintas a las de combustibles fósiles o centrales nucleares debido a su diversidad y abundancia. Se considera que el sol abastecerá estas fuentes de energía durante los próximos cuatro mil millones de años.

3.6.3 Necesidad por el impacto

Tanto por razones económicas como ecológicas, es necesario el desarrollo de nuevas alternativas energéticas, que sean menos agresivas contra el medio ambiente.

La primera ventaja de una cierta cantidad de fuentes de energía renovables es que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones, contrariamente a lo que ocurra con los combustibles, sean fósiles o renovables. Algunas fuentes renovables no emiten dióxido de carbono adicional, salvo los necesarios para su construcción y funcionamiento, y no presentan ningún riesgo suplementario, tales como el riesgo de la operación y residuos generados por la generación de origen nuclear.

Algunos sistemas de energía renovable generan problemas ecológicos particulares. Los primeros aerogeneradores eran peligrosos para los pájaros debido a que sus aspas giraban muy deprisa, mientras que las centrales hidroeléctricas pueden crear obstáculos a la emigración de ciertos peces, un problema serio en muchos ríos del mundo. No obstante, no son comparables con los problemas medioambientales que provocan las energías convencionales.

Como solución a estos problemas medioambientales y tecnológicos existen muchas alternativas energéticas. Algunas de ellas no han sido desarrolladas por las limitaciones técnicas y económicas, otras se han utilizado solo parcialmente.

4 Energía solar

4.1 Antecedentes

La disponibilidad de la energía en el mundo se ha convertido en un problema crucial, dado que la gran mayoría de los países, tanto los en vía de desarrollo como los industrializados, se ven afectados por las crecientes demandas requeridas para satisfacer sus metas económicas y sociales.

El sol es una fuente inagotable de recursos para el hombre. Provee una energía limpia, abundante y disponible en la mayor parte de la superficie terrestre y puede por tanto, liberarlo de los problemas ambientales generados por los combustibles convencionales.

Los problemas técnicosⁱ que se plantean para el aprovechamiento de la energía son los siguientes:

- Gran dispersión de la energía solar sobre la superficie de la tierra.
- Carácter incontrolable y variable en el tiempo de la intensidad de radiación solar.

La radiación solar que recibe una superficie horizontal es del orden de 1kW/m^2 al mediodía, variando según la latitud del lugar, nubosidad, humedad y otros factores, pero su principal problema es su intermitencia. En el invierno, es menor, de modo que la mayoría de los casos la disponibilidad no coincide con la demanda. Se requiere el almacenamiento para un tiempo de autonomía y además, en caso de superarse el mismo, con el apoyo de sistemas de respaldo o fuentes suplementarias de energía.

Para el aprovechamiento destinado a la aplicación de la energía solar es necesario realizar los siguientes procesos:

- Captación y concentración de la energía solar.
- Transformación para su utilización.
- Almacenamiento para satisfacer uniformemente la demanda con un tiempo de autonomía establecido.
- Disponer de una fuente energética suplementaria disponible si se supera el tiempo de autonomía-transporte de la energía almacenada, para su utilización en los puntos de consumo.

Para lograr una solución técnica que optimice las inversiones a realizar, en cada caso particular es necesario analizar detenidamente cuál es el tiempo de autonomía adecuado para la instalación, teniendo en cuenta que cuanto mayor es la

capacidad del almacenamiento, menor es el tamaño de las fuentes energéticas de apoyo.

4.2 La medición de la energía del sol: la constante solarⁱ

La combinación de tres factores: la distancia Tierra-Sol, el diámetro solar y la temperatura del sol determinan un flujo luminoso, un flujo de energía que incide sobre la superficie de la Tierra.

El flujo luminoso, que es en realidad un flujo de energía, tiene unidades por unidad de área y por unidad de tiempo.ⁱ

Para su aplicación en el campo de la energía, la emisión de energía en el Sol puede considerarse constante. El recurso energético solar esta mucho más ligado, en la superficie terrestre, a las variaciones meteorológicas, que a las solares.

La constante solar, ($G_{sc}=1.353 \text{ W m}^{-2}=1.940\text{cal/cm}^2 \text{ min}=428 \text{ Btu/ft}^2\text{h}=4.872\text{kJ/m}^2\text{h}$),ⁱ es el flujo de energía proveniente del sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Solar, fuera de toda atmosfera.

Aclaremos algunos puntos de esta definición:

- Primero, es un flujo de energía, es decir, la constante solar se refiere a una cantidad de energía que incide, instantáneamente, sobre una superficie de área unitaria.
- Segundo, esta superficie hipotética es perpendicular o normal a la dirección de propagación de la luz. Una superficie en posición oblicua respecto de la dirección del Sol, recibiría un menor flujo de energía.
- Tercero, nuestra superficie hipotética se encuentra situada a la distancia media de la Tierra a Sol. La distancia desde la fuente de radiación hasta el plano en cuestión, influye fuertemente en el flujo de energía. La distancia Tierra-Sol no es constante, debe considerarse un valor promedio, para poder hablar de una constante.
- Por último, la superficie hipotética, debe estar colocada fuera de la atmosfera, para evitar la atenuación de la radiación causada por la diversidad de fenómenos físicos y químicos que se verifican en la atmosfera.

4.3 Distribución espectral de la radiación solar

El sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma, hasta las ondas de radio. Sin embargo, para los fines de

aprovechamiento de su energía, solo es importante la llamada **radiación térmica** que incluye sólo el ultravioleta (UV), la radiación visible (VIS) y la infrarroja (IR).ⁱ

Todos los cuerpos emiten cierta cantidad de radiación en virtud de su temperatura. A mayor temperatura ocurren dos cambios en la radiación emitida:

1. La intensidad de la emisión es mayor, refiriéndose a, un mayor número de watts por metro cuadrado que abandonan el cuerpo.
2. El color o tipo de radiación cambia hacia una menor longitud de onda, esto es, del IR al VIS y al UV, a medida que aumenta la temperatura.

La fotosfera se encuentra a unos 6.000K y, por tanto, emite un cierto flujo de energía correspondiente a esa temperatura. En la Figura 3 se muestra la distribución espectral del sol. Que muestra la irradiancia espectral (energía por unidad de tiempo, en la unidad de área, por unidad de longitud de onda) en función de la longitud de onda. La línea continua irregular corresponde a la irradiancia observada, medida desde la Tierra.ⁱ

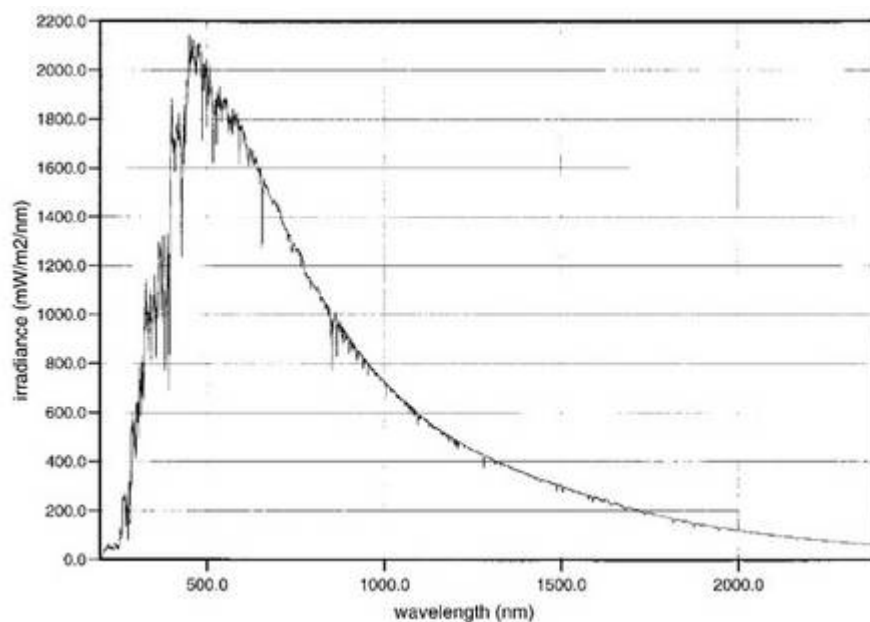


Figura 3: Irradiancia espectral del Sol

4.4 La radiación solar terrestre

Para alcanzar la superficie terrestre la radiación solar debe atravesar la atmósfera donde experimenta diversos fenómenos, absorción, y difusión que disminuyen la intensidad final.

La radiación que llega directamente es la denominada radiación directa y la que previamente es absorbida y difundida por la atmósfera (muy significativa en días nublados) es denominada radiación difusa.

La radiación solar, tanto directa como difusa, se refleja en todas las superficies en las que incide dando lugar a la radiación reflejada. La reflexión dependerá de las características y naturaleza de la superficie reflectora.

La radiación solar global es la suma de los tres tipos citados, directa, difusa y reflejada, y es la que podemos aprovechar para su transformación térmica. Las propiedades de radiación directa, dispersa y reflejada recibido por una superficie determinada dependen:

- De las condiciones meteorológicas.
- De la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal.
- De la presencia de superficies reflectantes.

En función del lugar varia la relación entre la radiación dispersa y la total, ya que al aumentar la inclinación de la superficie de captación, disminuye la componente dispersa y aumenta la componente reflejada. La inclinación que permite maximizar la energía recogida puede ser diferente del lugar.

La posición óptima, se obtiene cuando la superficie está orientada al sur, con ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar: la orientación al sur, de hecho, maximiza la radiación solar captada recibida durante el día y si la inclinación es igual a la latitud hace que sean mínimas, durante el año, las variaciones de energía solar captadas debidas a la oscilación de 23.5° de la dirección de los rayos solares respecto a la perpendicular a la superficie de recogida.

En la Figura 4 se muestran las trayectorias estacionales del sol para un punto situado a 40° de latitud norte. La radiación directa será mayor cuando la incidencia de los rayos solares sea perpendicular a la superficie.

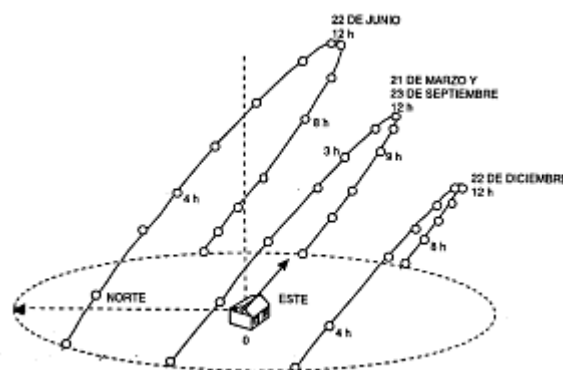


Figura 4: Trayectorias estacionales del Sol para un punto situado a 40° de latitud Norte

Los valores de la radiación solar total sobre cada punto serán variables. No obstante este valor también depende de la ubicación concreta de la superficie y de la distancia al sol, es decir, del día y del año.

4.5 La captación térmica

Se entiende por captación térmica de la energía solar al procedimiento de transformación de la energía radiante del sol en calor energía térmica. Nos referiremos a aplicaciones de la energía solar a baja temperatura cuando la energía térmica que se obtiene se utiliza para temperaturas inferiores a 80°C.

Se pretende de esta forma obtener a partir del solar una energía que se pueda utiliza en aplicaciones térmicas: calentar agua, usos industriales, calefacción de espacios, calentamientos de piscinas, secaderos, etc.

5 Energía solar fotovoltaica

5.1 Introducción y generalidades

Las principales aplicaciones de la energía solar son de tipo térmico, donde la energía luminosa, mediante diversos mecanismos se aprovecha en forma de calor. Sin embargo, existen una aplicación no fototérmica de mucha importancia que consiste en la producción de electricidad a partir de la radiación solar mediante celdas solares y paneles fotovoltaicos.

La energía eléctrica no está presente en la naturaleza como fuente de energía primaria, y solo se puede disponer de ella obteniéndola por transformación de alguna otra forma de energía. Recientemente, el hombre ha aprendido a obtener electricidad a partir de la energía solar mediante procesos fototérmicos y fotovoltaicos. Los primeros operan bajo principios semejantes a los de las centrales térmicas convencionales. Los denominados fotovoltaicos, presentan una importante simplificación respecto a los procesos energéticos convencionales, debido a que transforman una energía primaria, la solar, en electricidad de un modo directo, es decir, sin transformaciones intermedias en otras formas de energía. De lo anterior, se puede decir que las células solares o celdas fotovoltaicas son dispositivos capaces de transformar la radiación solar en electricidad, de un modo directo. Estos dispositivos son estáticos y en absoluto semejantes a los generadores convencionales.ⁱⁱ

A corto-medio plazo la energía solar fotovoltaica es una de las fuentes de energía renovables más amortizables y más sencillas.

Cada día la energía eléctrica es más imprescindible en nuestras vidas y cada día está más limitada y saturada, de ahí que se tenga que recurrir a fuentes de energía renovables para abastecernos energéticamente o bien vender energía a las compañías distribuidoras.

A parte de todo esto, se tiene que ser conscientes del favor que se le realiza al medioambiente y en general a la naturaleza, ya que como se sabe, se habla de fuentes de energía prácticamente limpias y sin apenas daño a los ecosistemas.

La energía solar fotovoltaica proviene de la interacción de los fotones (partículas que forman la luz) provenientes de la radiación solar con los elementos semiconductores que componen los paneles solares o células fotovoltaicas que es donde realmente tiene lugar la transformación de la energía luminosa (fotones) en electricidad (electrones en movimiento).

La tensión generada por los paneles solares es continua (como la de las pilas).

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el científico francés, Henri Becquerel. Las primeras celdas solares de selenio fueron desarrolladas en 1880, sin embargo, no fue sino hasta 1950 que se desarrollaron las celdas de silicio monocristalino que actualmente dominan la industria fotovoltaica. Las primeras celdas de este tipo tenían una eficiencia de conversión de sólo 1%; ya para 1954 se había

logrado incrementar la eficiencia al 6 % en condiciones normales de operación, mientras en el laboratorio se lograron eficiencias cercanas a 15%. Desde entonces hasta nuestros días la eficiencia en las células no ha mejorado notablemente.

Antes de llevar a cabo la explicación de la transformación de la energía luminosa en electricidad, se puede recordar algunos conceptos de electricidad. Se llaman materiales conductores de electricidad a los que la dejan pasar libremente ya que tienen electrones libres o pueden liberarse fácilmente. Llamamos materiales aislantes a los que oponen una enorme resistencia al paso de la corriente eléctrica.

Entre ambos extremos hay unos materiales llamados **semiconductores**. Estos materiales si están a 0K son aislantes, pero si reciben energía, se encuentran más cerca de los conductores y pueden producir corrientes de electrones.

a. El efecto fotoeléctrico

*Se define como “efecto fotoeléctrico a la aparición de una corriente eléctrica en ciertos materiales cuando estos se ven iluminando por radiación electromagnética, sin que sea necesario que aparezca o intervenga ningún efecto mecánico o físico”.*ⁱ

La fotoelectricidad fue descubierta y descrita experimentalmente por Heinrich Hertz en 1887. A pesar de ello, el efecto fotoeléctrico o fotovoltáico constituyó un misterio abierto para los científicos hasta que Albert Einstein en 1905 aportó una explicación del mismo, basando su formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los que notas de Max Planck.

La generación de electricidad desde los paneles solares y las células fotovoltaicas constituyen algunas de las aplicaciones más conocidas del efecto fotoeléctrico.

Como se puede ver en la Figura 5, los fotones incidentes son absorbidos por los electrones del medio dotándoles de una cantidad de energía que es suficiente para escapar del mismo.

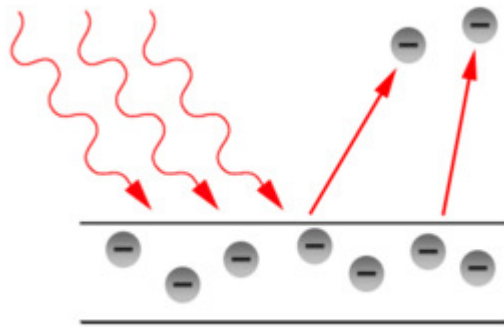


Figura 5 El efecto fotoeléctrico

b. El silicio: Elemento químico básico

El silicio es un elemento químico que cuenta con 14 electrones de los 4 son de valencia, lo que significa que están disponibles para unirse con los electrones de valencia de otros átomos. De este modo, en una configuración cristalina de silicio químicamente puro, cada átomo estará unido de forma covalente con otros 4 átomos de manera que dentro del cristal no habrá, como consecuencia del enlace químico covalente, electrones libres.

Valencia: número de electrones encontrados en el nivel más extremo de un átomo (último nivel de energía), que pueden compartirse con otro átomo para formar enlaces químicos. La valencia puede ser negativa o positiva; positiva cuando tenga menos de 4 electrones y es capaz de donarlos y negativa cuando tiene más de 4 electrones y tiene la capacidad de aceptar electrones para completar el octeto.

Electrones de valencia: son los que se encuentran en la capa de valencia, la cual es la representación del último nivel de energía de la configuración electrónica de un elemento.

Como en estado puro el silicio no es muy semiconductor, y por lo tanto se le “dopa” átomos de fósforo, que tienen 5 electrones en su capa externa. Así tenemos un silicio dopado con fósforo, que tiene un excedente de cargas negativas. Este material es “tipo n”. El material “tipo p” es silicio dopado con boro, que tiene 3 electrones en su capa externa, por lo que se produce un excedente de cargas positivas. El silicio tiene 4 electrones de valencia y el boro sólo tiene tres. Al estar estas dos zonas dopadas en contacto, se produce un diodo, ya que los electrones excedentes de la capa n son atraídos por las cargas positivas de la capa p esto da origen a una corriente eléctrica.

En la Figura 6 se puede observar cuál es la estructura del retículo cristalino del silicio puro.

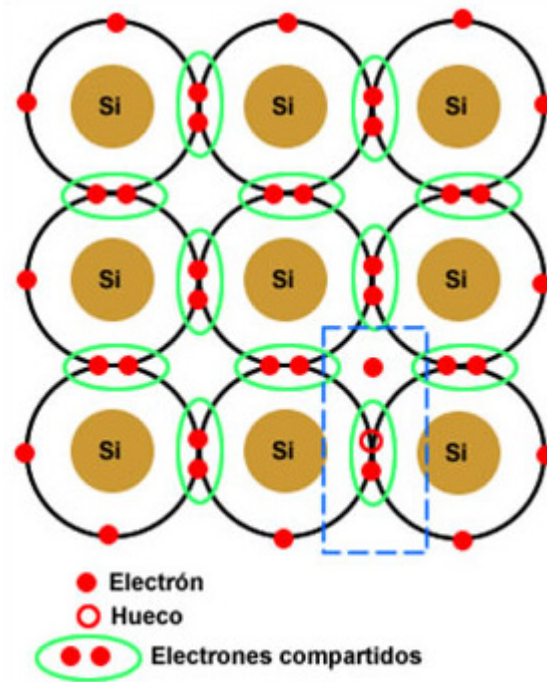


Figura 6 Estructura del retículo cristalino puro

En la Figura 7 se puede observar las diferentes estructuras del silicio dependiendo de la sustitución del átomo, en la primera aparece el retículo cristalino en el caso de enlace con átomos de boro, y en la segunda imagen se puede observar la estructura cuando se realiza una combinación con átomos de fósforo.

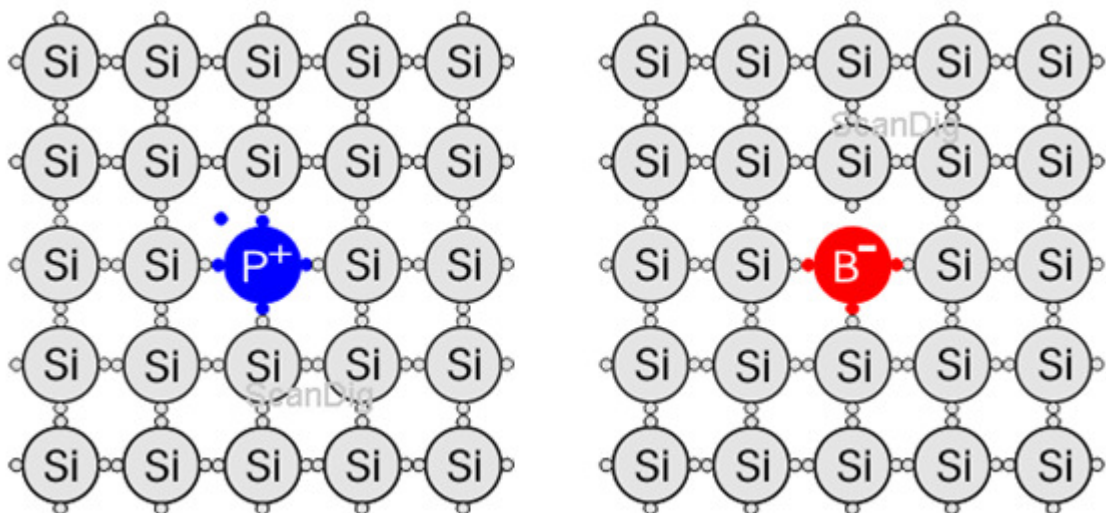


Figura 7 Estructuras cristalinas de silicio con otros elementos

Por lo tanto, en el caso de que se produzca el enlace con fósforo, los portadores de carga libres poseen potencial negativo y el material es llamado semiconductor de "tipo n". Mientras, en el caso en que la mencionada sustitución de átomos de silicio se produzca con átomos de boro, los portadores de carga son positivos y el material es llamado semiconductor de "tipo p".

Los electrones que se encuentren en estado libre dentro de la zona de material 'tipo n' detectarán que existe colindante una región en la que no existen electrones libres y, eso hará que se genere un flujo de estos electrones portadores hacia la zona, como consecuencia del intento de restablecer el equilibrio. Del mismo modo, los huecos existentes en la 'zona p' detectarán una región en la que no existen huecos y se producirá, por tanto, un flujo de cargas positivas en sentido contrario al flujo de electrones. Debido al avance de este proceso de difusión de electrones y huecos, en la 'zona p' se generará un exceso de cargas con potencial negativo mientras en la 'zona n' se generará un exceso de cargas con potencial positivo.

Por tanto, en el área de unión de los dos materiales se origina un campo eléctrico que se hace cada vez mayor a medida que huecos y electrones se siguen difundiendo hacia lados opuestos. Este proceso no terminará hasta que el potencial eléctrico de este campo alcance un valor que impida la posterior difusión de electrones y huecos.

Una vez que se haya alcanzado este valor de equilibrio, se habrá creado en el diodo p-n un campo eléctrico permanente sin la ayuda de campos eléctricos o elementos externos. Este potencial eléctrico permite explicar el por qué del efecto fotovoltaico.

Supongamos que un fotón (partícula que constituye un rayo solar) incide sobre la región de tipo p del material. Si el fotón incidente posee una energía térmica mayor que la energía mínima necesaria para romper un enlace del retículo del silicio (banda-gap) será absorbido y con ello se creará una nueva pareja electrón-hueco. El efecto de la creación de esta nueva pareja será que el electrón liberado se trasladará hacia la 'zona-n' a causa del potencial eléctrico. En cambio, si el fotón incidente sobre la zona n, se generaría también una nueva pareja pero en este caso el hueco creado se moverá hacia la 'zona-p'.

Este flujo va a tener como consecuencia la acumulación de cargas positivas en la 'zona-p' y de cargas negativas en la 'zona-n', dando origen a un campo eléctrico opuesto al creado por el mecanismo de difusión.

Cuanto mayor sea el número de fotones que inciden sobre la unión, mayor será el número de los campos que pasen a anularse el uno con el otro, hasta que se alcance un valor umbral en el que ya no haya un campo interno que separe cada pareja electrón-hueco. Esta es la condición que determina la tensión a circuito abierto de la célula fotovoltaica. Si se colocasen unos electrodos (contactos metálicos) sobre la

superficie de la célula se puede utilizar el potencial creado, haciendo circular la corriente de electrones.

5.2 Los semiconductores

El factor clave para que el desarrollo de la conversión fotovoltaica ha sido el semiconductor. Elementos como el silicio, el germanio, o sales como el arseniuro de galio, el sulfuro de cadmio y algunas otras tienen la característica natural de ser portadores de dos tipos de corrientes eléctricas: una con electrones libres, capaces de viajar por el cristal, y otra llamada “huecos”, dotada de carga positiva. Así, existen semiconductores llamados tipo *p*, en los cuales predomina la conducción por vacíos y semiconductores llamados tipos *n* en los que predomina la conducción de electrones libres. Estos conductores, en los cuales las características eléctricas están determinadas por átomos de impurezas, se les denominan **semiconductores extrínsecos**.

Por el contrario, se puede hablar de los **semiconductores intrínsecos**. Son aquellos cuyo comportamiento eléctrico se basa en la estructura electrónica inherente al material puro.ⁱⁱⁱ

- **Semiconductores Intrínsecos**

Los semiconductores intrínsecos se caracterizan por tener una estructura de bandas de electrones: a 0K, la banda de valencia está completamente llena y está separada de la banda de conducción vacía por un intervalo prohibido de energía relativamente estrecho, generalmente menos que 2eV.

- **Semiconductores Extrínsecos**

Todos los semiconductores comerciales son extrínsecos, es decir, el comportamiento eléctrico está determinado por impurezas, las cuales, cuando están presentes en incluso pequeñas concentraciones, introducen electrones o huecos en exceso.

- Semiconducción extrínseca de tipo *n*

Para poder ver claramente cómo se consigue la semiconducción extrínseca, se puede considerar el silicio elemental un átomo de Si tiene cuatro electrones, y cada uno de ellos participa en el enlace covalente con una de los cuatro átomos de Si contiguos. Ahora suponer que un átomo de una impureza de valencia 5 es añadido como impureza sustitucional. Solamente cuatro de los cinco electrones de valencia de estas impurezas pueden participar en el enlace debido a que solamente existen cuatro posibles enlaces con los átomos vecinos. El electrón extra está débilmente ligado a la

región alrededor del átomo de impureza por atracción electrostática débil. La energía del enlace de este electrón es relativamente pequeña y es fácilmente desligado del átomo de impureza se convierte en un electrón libre o de conducción.

Para cada uno de los electrones débilmente ligados, existe un nivel de energía, o estado energético, que es localizado dentro del intervalo de energía prohibido justo por debajo de la banda de conducción. La energía de enlace del electrón corresponde a la energía requerida para excitar el electrón desde uno de estos estados de la impureza a un estado dentro de la banda de conducción. La energía de enlace del electrón corresponde a la energía requerida para excitar el electrón desde uno de estos estados de la impureza a un estado dentro de la banda de conducción. Cada excitación suministra o dona un electrón a la banda de conducción; una impureza de este tipo se le denomina *donador*.

El número de electrones en la banda de conducción excede al número de huecos en la banda de valencia.

Los electrones son los *transportadores mayoritarios* de carga debido a su densidad o concentración; los huecos, se denominan *transportadores minoritarios de carga*.

- Semiconducción extrínseca del tipo *p*

El efecto contrario se produce por la adición al silicio o germanio de impurezas trivalentes sustitucionales tales como aluminio, boro o galio. Uno de los enlaces covalentes alrededor de cada uno de estos átomos es deficitario en un electrón, tal deficiencia puede verse como un hueco que está débilmente ligado a un átomo de impurezas. El electrón y el hueco intercambian sus posiciones. Un hueco móvil se considera como un estado excitado y participa en el proceso de conducción.

Las excitaciones extrínsecas, también pueden representarse utilizando el modelo de bandas. Cada átomo de impureza de este tipo introduce un nivel de energía dentro del intervalo prohibido, por encima aunque muy cerca del máximo de la banda de valencia. En una transición de este tipo solamente se produce un transportador: un hueco en la banda de valencia; no se crea un electrón libre en el nivel de la impureza ni tampoco en la banda de conducción. Una impureza de este tipo se denomina *aceptor*, porque es capaz de aceptar un electrón de la banda de valencia, dejando detrás un hueco. El nivel de energía

dentro del intervalo prohibido introducido por este tipo de impurezas se denomina **estado aceptor**.

Para este tipo de conducción extrínseca, la concentración de huecos es mucho mayor que la de electrones. En estas condiciones un material se denomina de *tipo p* porque las partículas positivamente cargadas son las responsables primarias de la conducción eléctrica.

En los semiconductores extrínsecos se crean un gran número de transportadores a temperatura ambiente, por la energía térmica disponible. Las conductividades en los semiconductores extrínsecos a temperatura ambiente son relativamente elevadas.

El silicio es el material semiconductor intrínseco más utilizado en la tecnología fotovoltaica. Primero es necesario obtener el silicio como un cristal de una gran pureza y después doparlo con impurezas en concentraciones infinitesimales.

Añadiendo al silicio impurezas de fósforo o arsénico, el silicio pasa a ser de tipo *n*. En cambio, si las impurezas añadidas son de boro o galio, lo convierten en tipo *p*. Este proceso es costoso y tecnológicamente muy complejo, razón por la cual las células fotovoltaicas son caras y requieren tecnología de vanguardia.

El fenómeno que justifica el comportamiento de los semiconductores tiene que ver con la distribución de los átomos en la estructura cristalina. Recordemos que un átomo de silicio es como un tetraedro. Cuando se introduce un átomo de dopante tipo *p* como el fósforo el resultado es un electrón libre que puede viajar por el cristal de silicio. En cambio, en los semiconductores de tipo *n*, como el silicio dopado con boro quedan cargas de signo positivo.

Cuando un fotón incide sobre el semiconductor, como consecuencia del efecto fotoeléctrico, se rompen los enlaces químicos y se genera una corriente eléctrica, con un valor variable según la temperatura ambiente, que reconducirá el movimiento de los electrones en la dirección y sentido de la llamada unión *p-n*. Los fotones de la luz producen una tensión eléctrica parecida a la que se produce en los bornes de la pila seca. Mediante contactos metálicos en cada una de las caras, se puede capturar esta energía eléctrica para con ello poder utilizarla en distintas aplicaciones.

5.3 Tipos de sistemas fotovoltaicos

5.3.1 Generalidades

Se define como sistema fotovoltaico el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar y transformar la energía solar disponible, transformándola en utilizable como energía eléctrica.^{iv}

Independientemente de su utilización y el tamaño de potencia, se pueden dividir en dos categorías:ⁱ

- Aislados ('stand alone')
- Conectados a la red ('grid connected')

La estructura física de un sistema fotovoltaico puede ser muy diferente, pero normalmente se pueden distinguir tres elementos fundamentales: el campo fotovoltaico, sistema de acondicionamiento de la potencia, sistema de adquisición de datos.

5.3.2 Sistemas aislados

Los sistemas aislados se utilizan normalmente para proporcionar electricidad a los usuarios con consumos de energía muy bajos para los cuales no compensa pagar el coste de la conexión a la red, y para los que sería muy difícil conectarlos a su posición poco accesible.

Por el hecho de no estar conectados a la red eléctrica, normalmente están equipados con sistemas de acumulación de la energía producida. La acumulación es necesaria porque el campo fotovoltaico puede proporcionar energía solo en las horas diurnas, mientras que a menudo la mayor demanda por parte del usuario se concentra en las horas de la tarde y de la noche.

Durante la fase de insolación es necesario prever una acumulación de la energía no inmediatamente utilizada y que proporciona a la carga cuando la energía disponible es reducida e incluso nula. Una configuración de este tipo implica que el campo fotovoltaico debe estar dimensionado de forma que permita, durante las horas de insolación, la alimentación de la carga y de la recarga de las baterías de acumulación.

Los principales componentes que forman un sistema fotovoltaico aislado son: i

1. módulos fotovoltaicos
2. regulador de carga
3. inversor
4. sistema de acumulación (baterías de acumulación)

La energía producida por los módulos fotovoltaicos es almacenada en baterías de acumulación. La carga alimentada, a través del regulador de carga, por la energía acumulada en las baterías.

El regulador de carga sirve fundamentalmente para preservar los acumuladores de un exceso de carga por el generador fotovoltaico y de la descarga por el exceso de uso. Ambas condiciones son nocivas para la correcta funcionalidad la duración de los acumuladores.

Normalmente, la potencia requerida por el usuario no es proporcional a la radiación solar, una parte de la energía producida por el campo fotovoltaico tiene que ser almacenada para poder ser reutilizada cuando el usuario la necesite. Esta es la finalidad del sistema de acumulación. Un sistema de acumulación está formado por unos conjuntos de acumuladores recargables, dimensionado de forma que garantice la suficiente autonomía de alimentación de la carga eléctrica. Las baterías que se utilizan con esta finalidad son acumuladores de tipo estacionario y solo en casos especiales es posible utilizar baterías tipo automoción.^v

Las baterías para uso fotovoltaico tienen que cumplir los siguientes requisitos:

- a. bajo valor de auto descarga,
- b. larga vida útil
- c. bajo mantenimiento
- d. elevado número de ciclos de carga-descarga.

La tecnología actual permite usar baterías de plomo ácido de larga duración (más de 6 años), con exigencias de mantenimiento casi nulas.

En cuanto al inversor, su finalidad en los sistemas aislados es la de transformar corriente continua (DC) producida por el campo fotovoltaico, en corriente alterna (AC), necesaria para la alimentación directa de los usuarios. El inversor tiene que estar dimensionado para poder alimentar directamente la carga que se le quiere conectar. Es evidente que el inversor en este tipo de instalaciones no es un componente indispensable. Es posible incluso alimentar directamente con corriente continua de baja tensión la carga.

Según se puede ver en la Figura 8, una instalación solar fotovoltaica aislada se compone de:

1. Módulos fotovoltaicos.
2. Regulador de carga.
3. Batería
4. Inversor
5. Puntos de consumo

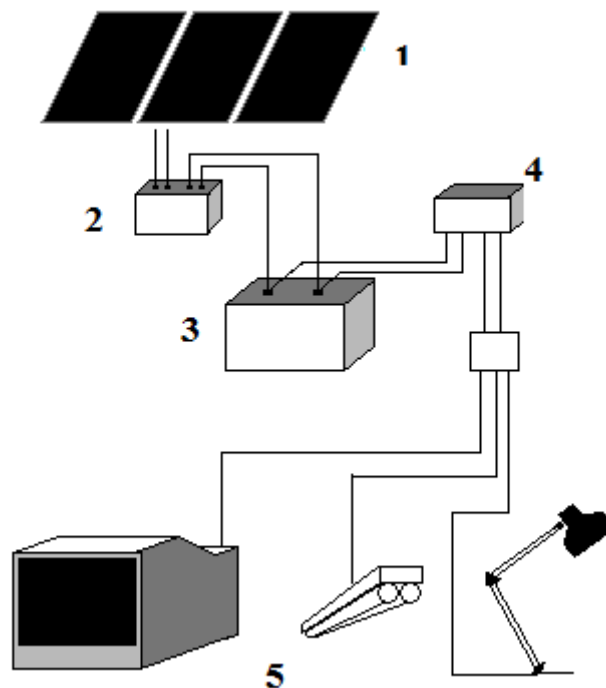


Figura 8: Instalación solar fotovoltaica aislada

5.3.3 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Los sistemas conectados en red, normalmente no tienen sistemas de acumulación, ya que la energía producida durante las horas de insolación es canalizada a la red eléctrica; al contrario, durante las horas de insolación escasa o nula, la carga viene alimentada por la red. Un sistema de este tipo, desde el punto de vista de la continuidad de servicio, resulta más fiable que uno no conectado a la red que, en caso de avería, no tiene posibilidad de alimentación alternativa. Se pueden obtener sistemas de alta fiabilidad integrando en el sistema aislado con una fuente energética tradicional, por ejemplo, el diesel (sistema híbrido diesel-fotovoltaico). La tarea de los sistemas conectados a la red es la de introducir en la red la mayor cantidad posible de energía.

En los sistemas conectados a red es necesario conectar con las líneas de distribución, cumpliendo con los requisitos demandados por la compañía eléctrica.

El inversor es uno de los componentes más importantes en los sistemas conectados a red, ya que maximiza la producción de corriente del dispositivo fotovoltaico y optimiza el paso de energía entre el módulo y la carga.^v

El inversor es un dispositivo que transforma la energía continua producida por los módulos (12V, 24V, 48V,...) en energía alterna (generalmente 220V), para alimentar el sistema y/o introducirla en la red, con la que trabaja en régimen de intercambio. Los

inversores para la conexión a la red eléctrica están equipados generalmente con un dispositivo electrónico que permite extraer la máxima potencia, paso por paso, del generador fotovoltaico.

El dispositivo de intercambio con la red sirve para que la energía eléctrica introducida en la red tenga todas las características requeridas por la misma.

El contador de energía mide la energía producida por el sistema fotovoltaico durante su periodo de funcionamiento.

Según se puede ver en Figura 9, una instalación solar fotovoltaica aislada se compone de:

1. Módulos fotovoltaicos.
2. Inversor
3. Contador

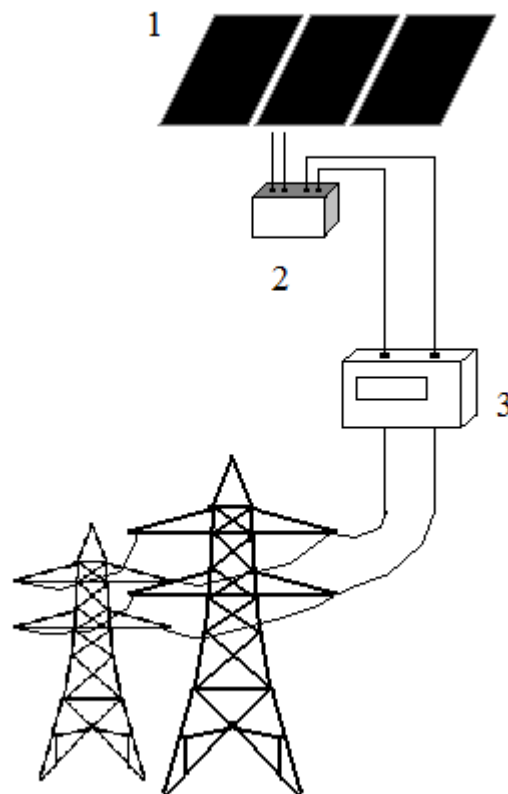


Figura 9: Instalación solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica

5.3.4 Centrales solares fotovoltaicas

También se les conoce con el nombre de “huertos solares”. En estas instalaciones la finalidad es vender la electricidad a la red eléctrica. Este tipo de instalaciones suelen ser muy grandes para optimizar la producción.

Existen empresas que se dedican a la promoción de huertos solares para la producción de electricidad.

Cualquier particular puede invertir en estos huertos solares comprando una parte mayor o menos de la instalación.

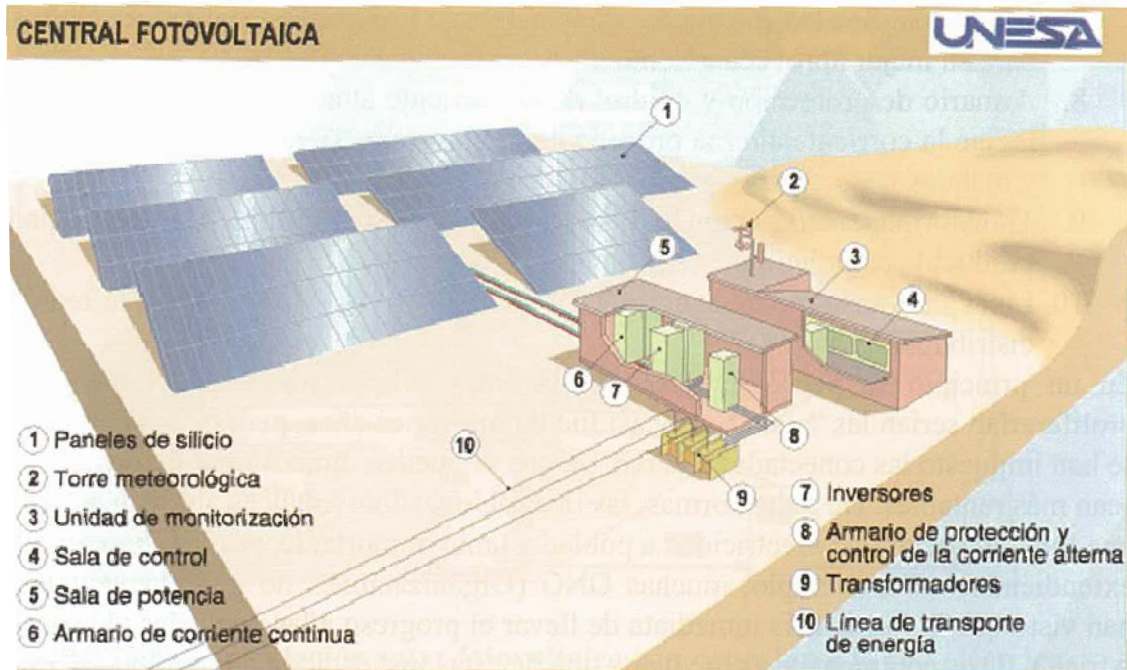


Figura 10: Central solar fotovoltaica para la producción de electricidad a partir de energía solar.

La Figura 10 presenta una instalación solar fotovoltaica para producir electricidad a partir de las radiaciones solares: sus componentes son:

1. Paneles de silicio
2. Torre meteorológica: analiza las variables meteorológicas de la zona que pueden afectar a las radiaciones luminosas. Con el resultado envía una señal a la sala de control
3. Unidad de monitorización
4. Sala de control: desde donde se realiza el control y la operación de toda la central eléctrica, permitiendo también subsanar cualquier problema o deficiencia.

5. Sala de potencia: donde se encuentran los armarios de corriente continua, corriente alterna y el inversor.

6. Armario de corriente continua. Es la que recibe la corriente continua producida por los paneles. Tiene todos los controles y mandos necesarios (mediad, protección, regulación).

5.3.5 Aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos

Desde el punto de vista histórico, el motivo de la construcción de las celdas fotovoltaicas fueron los satélites artificiales. La idea era construir un generador eléctrico para alimentar los equipos de toma de datos que llevaban a bordo, que presentara ventajas con respecto a otros generadores como los termoelectrónicos y las pilas de combustible. Las ventajas encontradas en este tipo de generadores: peso reducido, larga vida, ocupación de espacio mínima y nivel de insolación elevado y continuo por estar fuera de la atmosfera terrestre, aunque sus costos eran muy elevados. Para aplicaciones terrestres, el factor económico era muy importante si se deseaba tener una aplicación más generalizada y por lo tanto, desde esos años (1972-73), se inicio una tremenda carrera cuya meta era la simplificación y el descubrimiento de nuevas tecnologías, procesos, e investigación de nuevos materiales, que condujeron a un abaratamiento de las células solares y demás componentes del generador fotovoltaico. Dichos esfuerzos han rendido ya sus frutos y encontramos que en la actualidad los precios han bajado drásticamente y existen muchas más aplicaciones de las células solares:

- Electrificación rural y de viviendas aisladas: existen muchas zonas rurales y viviendas aisladas donde llevar energía eléctrica por medio de la red general sería demasiado costoso y por lo tanto no cuentan con este servicio. En este caso, la instalación de un generador fotovoltaico es ampliamente rentable.
- Comunicaciones: los generadores fotovoltaicos son una excelente solución cuando hay necesidad de transmitir cualquier tipo de señal o información desde un lugar aislado, por ejemplo, reemisores de señales de TV, plataformas de telemetría, radioenlaces, estaciones meteorológicas.



- Ayudas a la navegación: la aplicación puede ser relativa a la navegación misma o a sus señalizaciones, como alimentar eléctricamente faros, boyas, balizas, plataformas y embarcaciones.
- Transporte terrestre: iluminación de cruces de carreteras peligrosos y túneles largos. Alimentación de radioteléfonos de emergencia o puestos de socorro lejos de líneas eléctricas. Señalizaciones de pasos a desnivel o cambio de vías en los ferrocarriles.



- Agricultura y ganadería: mediante generadores fotovoltaicos podemos obtener la energía eléctrica necesaria para granjas que conviene que estén aisladas de las zonas urbanas por motivos de higiene. Sin embargo, la aplicación más importante y de futuro es el bombardeo de agua para riego y alimentación de ganado que normalmente se encuentra en zonas no pobladas. Otras aplicaciones pueden ser la vigilancia forestal de acumuladores para prevención de incendios.

- Aplicaciones en la industria: la obtención de metales como cobre, aluminio y plata por electrolisis y la fabricación de acumuladores electroquímicos.
- Difusión de la cultura: difusión de información mediante medios audiovisuales alimentados eléctricamente mediante generadores fotovoltaicos.

5.4 Los componentes de los sistemas fotovoltaicos

En la Figura 11 se puede ver los distintos componentes de una instalación solar fotovoltaica. A continuación se explicarán detenidamente uno a uno, de algunos de ellos la explicación será muy breve debido a que su funcionamiento no es objetivo para este proyecto.

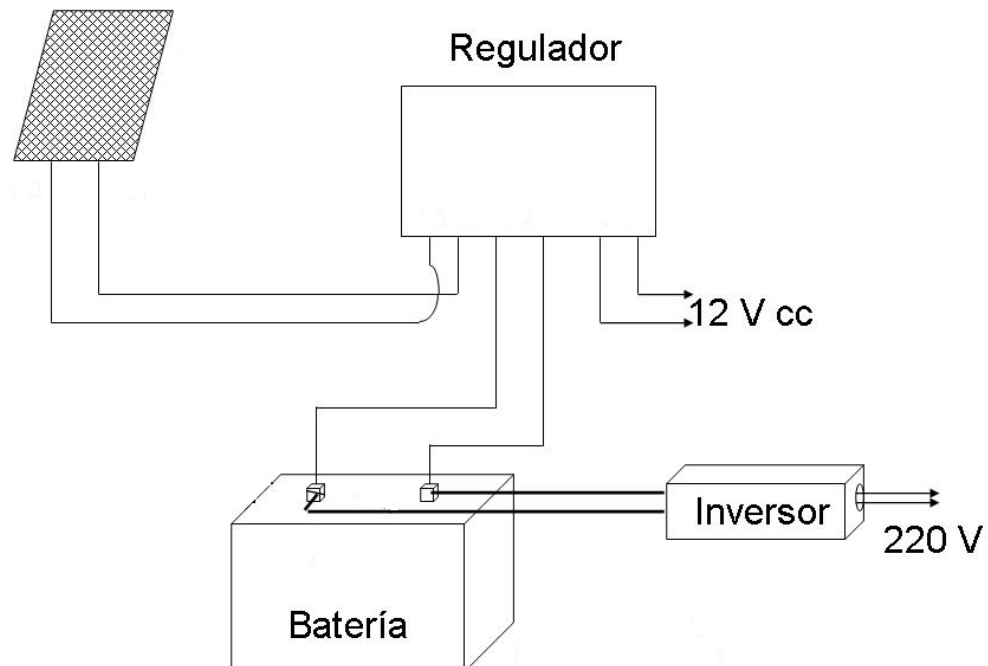


Figura 11: Esquema básico sistema fotovoltaico

5.4.1 La célula solar

En las células solares es donde tiene lugar la transformación de la energía luminosa del sol en electricidad.

La fabricación de las células fotovoltaicas o solares aún resulta cara, pero este es un campo en el que se está investigando mucho, como consecuencia de los problemas energéticos mundiales.

El rendimiento de las células de silicio es bajo (13 al 25 %). El rendimiento es la energía luminosa que realmente se transforma en electricidad.

Existen también células fotovoltaicas de sulfuro de cadmio que son más baratas pero que tienen un rendimiento tres veces menos que las de silicio.

Posteriormente se hará un estudio más a fondo de todo lo referente a construcción y fabricación de células fotovoltaicas.

5.4.1.1 La configuración de la célula solar

Al dopar un cristal puro de silicio además de aumentar su conductividad, se le convierte en receptor de huecos o electrones, tiene su aplicación en las uniones p-n que se utilizan en las células fotovoltaicas.

El cristal de tipo n puede absorber más electrones aunque excedan de los necesarios para enlazar los átomos debido a que no hay neutralidad eléctrica. Mientras, los de tipo p, absorben huecos.

En una célula solar, la luz incide generalmente sobre una lámina de tipo n de un grosor muy fino y penetra suficientemente en el cristal como para crear pares electrón-hueco en las proximidades de la unión con el cristal de tipo p. El grosor de la lámina superior influye en el rendimiento y deberá ser menor, por lo general, a 1 μm .

Al irradiar la célula, la lámina de tipo n recogerá electrones, mientras que la de tipo p recogerá los huecos de los pares creados estableciéndose entonces las diferencias de potencial dentro del cristal. Se obtiene corriente eléctrica con un circuito que une eléctricamente las láminas tipo p y n.

Los electrones de la lámina de tipo n pueden moverse hacia la lámina de tipo p. De aquí encontramos varias dificultades para obtener un buen rendimiento de las células:

- El semiconductor ofrece una resistencia al paso de la corriente cuando va desde las proximidades entre las zonas de tipo n y tipo p hasta los puntos en que la corriente entra en el circuito externo.

- Habrá más corriente cuanto mayor sea el contacto de las láminas con el conductor, sin embargo, la lámina superior debe ofrecer la mayor superficie posible a la radiación.
- El conductor eléctrico deberá ser un material con la menor resistencia posible, lo cual exige usar metales muy caros como oro y platino.^v

En el proceso por el cual un electrón absorbe un fotón pueden considerarse varios casos:

- Que el fotón tenga suficiente energía como para que la energía absorbida por el electrón baste para moverlo a la banda de conducción, solo se aprovechará la energía suficiente para hacer que el electrón se desvincule del núcleo del átomo y se perderá el resto en forma de calor, disminuyendo el rendimiento del dispositivo fotovoltaico. Para evitar esta pérdida de eficiencia pueden tomarse varias medidas.
- Que la parte del espectro de longitud de onda sea suficientemente larga, relativamente a la energía necesaria para hacer que el electrón se desvincule del núcleo del átomo semiconductor en la consideración, no se aprovechara ya que los fotones no tendrán suficiente energía como para mover los electrones a la banda de conducción.

La estructura más conveniente es la de una película delgada en la cara de la célula sobre la que incide la luz y en la capa del tipo opuesto.

La eficiencia también mejora haciendo grande la vida media de los portadores minoritarios en los materiales tipo-p y tipo-n o también haciendo que los materiales utilizados tengan, tanto altas movilidades de los electrones como de huecos.

En cuanto a las pérdidas de rendimiento, podemos decir que existen limitaciones físicas absolutas:

- Absorción incompleta de la radiación por la célula
- Utilización de una parte únicamente de la energía del fotón para crear pares electrón-huecos.
- Pérdidas dadas por el llamado “factor de voltaje” (relación entre la tensión a circuito abierto de la célula y la diferencia entre la potencia de conducción del electrón y la de valencia).
- Pérdidas dadas por el “Factor curvo”: (relación entre la tensión a circuito abierto de la célula y la tensión ideal de la unión p-n).

Estas limitaciones absolutas pueden minimizarse utilizando el material semiconductor adecuado esto es, con parámetros óptimos en cuanto a lo que se refiere a:ⁱ

- Las pérdidas por reflexión.
- El aprovechamiento incompleto de los pares electrón-hueco debido a la difusión en la unión p-n.
- Las pérdidas por resistencia interna del semiconductor, Pueden hacerse casi desaparecer técnicamente.

5.4.1.2 El silicio

El silicio es el elemento más abundante después del oxígeno y se encuentra en casi todas las rocas, sin embargo, hasta llegar a su forma cristalina sin imperfecciones o, al menos, con pocas, debe someterse a costosos procesos.

La célula fotovoltaica de mercado es normalmente un dispositivo formado por una delgada lámina de un material semiconductor, frecuentemente el silicio. El silicio es un material semiconductor con estructura cúbica con una configuración atómica en la que cada átomo de la red tiene cuatro electrones de valencia.

El silicio cristalino:

Las celdas de silicio monocristalino representan el estándar de la tecnología fotovoltaica comercial. Para fabricarlas el silicio es purificado, fundido y cristalizado ya sea en lingotes o en láminas delgadas; posteriormente el silicio es rebanado en obleas delgadas para formar celdas individuales, posteriormente las obleas se pulen por ambas caras, durante el proceso de corte y pulido se desperdicia casi la mitad del material original. Una vez pulidas las obleas se introducen por difusión a la alta temperatura dopante, típicamente boro y fósforo, con lo cual se convierte a la oblea en un semiconductor tipo p si se le añade boro, o tipo n si se añadió fósforo. La mayoría de las celdas fotovoltaicas producen un voltaje de aproximadamente 0.5V, independientemente del área superficial de la celda, sin embargo, mientras mayor sea la superficie de la celda mayor será la corriente que proporcionará.

El espesor requerido para que se lleve a cabo el efecto fotovoltaico y se evite al máximo la recombinación de portadores de carga es del orden de 3 a 4 μm , por este motivo, la celda se torna extremadamente frágil ocasionando que en el proceso de manufactura se generen más desperdicios.

Hasta ahora las células fotovoltaicas que existen en el mercado suelen estar constituidas con cristal de silicio como material base. Estos cristales de silicio pueden tener dos configuraciones básicas:

Silicio monocristalino

Silicio policristalino

Si bien el silicio es uno de los materiales más abundantes en la naturaleza, se encuentra como bióxido de silicio en la arena del mar; para poder utilizarlo en celdas solares se requiere que sea muy pura y en forma cristalina, para lo cual hay que realizar varios procesos.

Las características fundamentales de este material utilizado para la realización de las células solares son:

Silicio mono-cristalino: es el mejor y el más caro. La mayoría de las células fotovoltaicas actuales están hechas de este tipo de silicio. El proceso de fabricación es el siguiente: el silicio se purifica, se funde y se cristaliza en lingotes. Los lingotes obtenidos se cortan muy finamente para hacer las células monocristalinas.

- De rendimiento energético hasta el 12-16 %.
- Requiere un elaborado proceso de manufactura, que consume enormes cantidades de energía eléctrica, incrementando substancialmente el costo del material semiconductor.
- La estructura cristalina provee una superficie del brillo uniforme.

Silicio Poli-Cristalino: tiene menor rendimiento que el silicio monocristalino, pero es más barato, por lo que se está imponiendo su utilización, ya que reduce el coste por kilovatio solar. Se llama policristalino porque la cristalización es aleatoria, en vez de seguir un patrón homogéneo de cristalización como ocurre en el silicio cristalino.

- De rendimiento energético hasta el 11-14%.
- Se obtiene fundiendo el material semiconductor, el que es vertido en moldes rectangulares. Su estructura cristalina no es uniforme, de ahí el nombre de poli (muchos) y cristalino (cristales).
- La estructura policristalina muestra zonas de brillo diferente.

Las celdas policristalinas son fabricadas y operan de una manera similar a las monocristalinas. La diferencia es que durante su manufactura se emplea un silicio de menor calidad y costo, esto da como resultado celdas de eficiencia ligeramente menor. Al estar compuesta la celda por una serie de granos de silicio, a nivel macroscópico, quedan varios huecos entre las uniones de los granos y por tanto en esos microhuecos se interrumpe el fenómeno fotovoltaico. La diferencia de eficiencias entre el silicio monocristalino y el policristalino es relativamente pequeña y generalmente se absorbe en las evaluaciones de costos.

En el silicio la mayor pérdida de eficiencia corresponde a la colección incompleta de los pares electrón- hueco. Esto podría evitarse disminuyendo el grosor de la capa p

y aumentando la movilidad de los electrones que podrían alcanzar en mayor número el circuito externo.

Aumentando el nivel de dopado se mejoraría el rendimiento en la colección, sin embargo, disminuiría al mismo tiempo la movilidad de los portadores, por lo que no se habría ganado en rendimiento.

En cuanto a la relación coste/rendimiento, las células de silicio actuales son bastante caras, variando según los métodos con que se han obtenido. Los métodos que dan mejores rendimientos a las células de silicio son:

- El método de crecimiento de Czochralski, en el que se hace girar una semilla del cristal sumergida en el cristal de silicio fundido a la vez que se saca lentamente. Se pierde hasta un 70% del Silicio al cortarlo para obtener los sustratos finales. Se obtienen con él células que operan entre 15 y 18% de rendimiento.ⁱ
- El proceso Westinghouse, se forma una cinta estrecha de Silicio entre dos semillas y se tira hacia arriba de un fundido superenfriado de Silicio, se pueden obtener $24\text{cm}^2/\text{minuto}$ con rendimiento del 12%.ⁱ
- El proceso E.F.G o de Borde Definido, es otra técnica de formación de cinta, esta vez se tira de ella haciéndola pasar a través de la ranura que dejan dos moldes de grafito, obteniéndose grosores de 0.25 mm, con rendimiento del 11%.ⁱ
- El proceso R.T.R, en el que se hace crecer en vapor capas de silicio sobre un sustrato temporal del que se obtendrán las láminas que se someterán a un refinado de zona usando rayos laser enfocados, consiguiendo rendimientos del 9-10%.ⁱ

En el caso del silicio policristalino hay que, al menos, cortar y pulir las láminas. Se obtienen eficiencias entre 13 y 16% para 20cm^2 y 10% para 100cm^2 , en las que no parece perjudicar la policristalinidad. Se han obtenido células policristalinas por solidificación dirigida a lingotes largos con 14% de eficiencia.

Existen otros procesos para la producción del silicio cristalino:ⁱ

- Pueden obtenerse cristales de silicio en capas de 15-30 μ de grosor por medio de solidificación unidireccional seguida de crecimiento epitaxial con eficiencias entre 10 y 12.5%.
- A partir del proceso de implementación de iones con templamiento térmico del silicio se han obtenido eficiencias entre 14 y 16%.

- Produciendo el templamiento en células fotovoltaicas de silicio policristalino con iones implantados por medio de laser se obtienen eficiencias superiores al 14%.
- Bombardeando con un haz de Oxido de Indio-Estaño (ITO) silicio tipo p de cristal simple, se han obtenido eficiencias entre 13 y 15%. El oxido de Indio-Estaño depositado pulverizado sobre silicio tipo n ha dado eficiencias del 12% para silicio simple y 10% para Policristalino.
- Células de silicio con fosforo difundido hasta una profundidad de 0.5 μ a una concentración de alto nivel muestran rendimientos entre 11 y 14%.

El silicio amorfo: Los tipos de celda mencionados anteriormente tienen estructura cristalina, pero el silicio amorfo no tiene tal estructura. Al silicio amorfo también se le denomina película delgada. Las unidades de silicio amorfo se fabrican depositando capas delgadas de silicio, evaporado al vacío, sputtering (erosión iónica), deposición de vapor u otro método sobre un sustrato que puede ser vidrio, plástico o metal. Las celdas de silicio amorfo se presentan prácticamente en cualquier tamaño, siendo la limitante la configuración del domo de evaporación donde se efectúa el proceso.

Con el silicio amorfo se pueden obtener células fotovoltaicas bastante baratas.

En el silicio amorfo habrá muchos más centros de recombinación de pares que en el cristal de silicio, centros de recombinación por impurezas aparte, por la variación de enlace de los electrones con los átomos.

El rendimiento de las células de silicio amorfo crece, por lo tanto, con la calidad de las capas dopadas. Se han obtenido eficiencias últimamente cercanas al 7% con las células de uniones p-n iluminado la capa n.

Debido a que las capas de silicio permiten el paso de parte de la luz solar, se requiere depositar varias capas, una sobre otra. Las capas añadidas incrementan la cantidad de electricidad que la celda puede producir. La producción de electricidad se ve disminuida hasta en un 15% a las 8 semanas de que inicia la operación de la celda. Esto se debe a que la película delgada presenta una acelerada degradación a partir de que es expuesta a los rayos solares. A partir del cuarto o quinto año de operación las celdas presentan una degradación del 35 al 50%.

En los modelos de mercado, para compensar el bajo rendimiento de conversión, el panel apila tres capas de material amorfo. Cada una de ellas responde a un distinto rango de frecuencias dentro del espectro visible de la luz solar. El más profundo responde al rojo, el del medio al verde, y el de arriba al azul. Como la eficiencia total sigue siendo más baja que la de un panel de células cristalinas o policristalinas, la superficie requerida para obtener una determinada potencia de salida es siempre mayor. Estos paneles adquieren rigidez mecánica mediante el uso de una estructura “sándwich” de protección.

Este proceso permite la fabricación de un panel fotovoltaico flexible, el que puede adaptarse a superficies que no son completamente planas. La superficie activa de estos paneles no tiene una estructura cristalina, y por ello se la denomina amorfa (a=sin; morfos=forma). La ausencia de una estructura cristalina aumenta la posibilidad de que una carga libre sea atrapada, lo que se traduce en una menor eficiencia de conversión.

El silicio amorfo es el material fotovoltaico que más se ha instalado en el mundo, esto es debido a la gran cantidad de relojes, calculadoras, radios y demás artefactos domésticos que operan con energía solar.

En la Figura 12 se puede ver las diferentes configuraciones que se puede tener en el silicio.

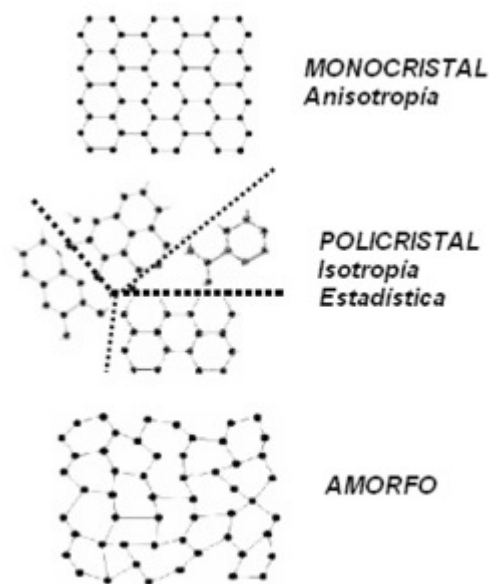


Figura 12: Estructuras distintos tipos de silicio

Tabla 1: Comparativa entre las tecnologías de silicio aplicadas a los paneles fotovoltaicos

TIPO DE CELDA	EFICIENCIA (%)		VENTAJAS	DESVENTAJAS
	Laboratorio	Producción		
Silicio Monocristalino	19.1%	12 a 16%	Tecnología bien desarrollada y probada Estable Mayor eficiencia Se fabrica en celdas cuadradas	Emplea mucho material caro Muchos desperdicio(casi la mitad) Manufactura costosa
Silicio Policristalino	18%	11 a 14%	Tecnología bien desarrollada y probada Estable buena eficiencia Menos costoso que el monocristal	Material costoso Mucho desperdicio Manufactura costosa Menor eficiencia que el monocristal
Silicio Amorfo O Película Delgada	11.5%	4 a 8%	Utiliza muy poco material Alto potencial y producción muy rápida Costo bajo, 50% del silicio cristalino Menos afectado por bajos niveles de insolación	Degradación pronunciada Menos eficiencia Menor durabilidad

5.4.1.3 Otros materiales empleados en las células solares

En la actualidad se están investigando diversas alternativas al silicio:

- **Células de CIGS:** estas células solares fotovoltaicas de cobre, indio, galio y diselenuro (CIGS, son las iniciales de cada material), y están hechas de capas muy delgadas. Debido a su alto rendimiento y su bajo coste, es posible que se vea en el futuro muchos paneles fotovoltaicos a base de estos materiales. Dentro de las células de capa extra-delgada, las CIGS tienen un elevado coeficiente de absorción, absorbiendo el 99 de los fotones que inciden sobre su superficie. Su coste es bajo pero su proceso de fabricación es difícil y muy caro. Además, la capa de cadmio es un problema, que está considerado como material tóxico por la Unión Europea, aunque en este caso no sea un problema.

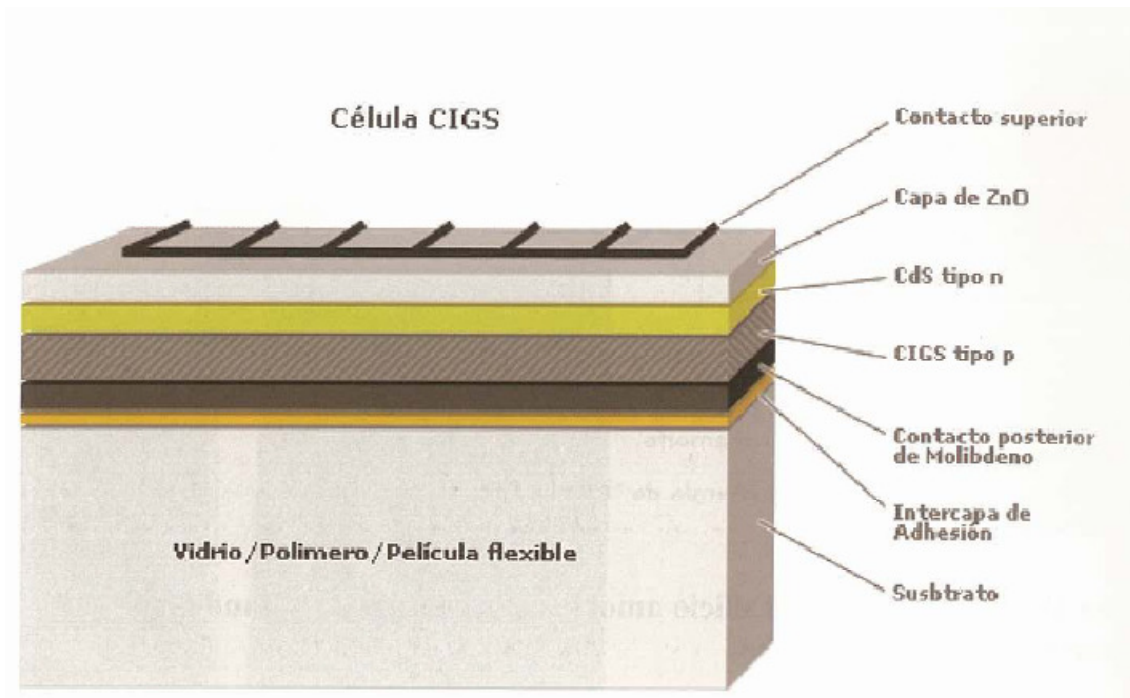


Figura 13: Célula de CIGS

- **El Arseniuro de galio (GaAs):** la molécula de cristal tiene una configuración y una movilidad electrónica similar al cristal de Silicio. Tiene la ventaja sobre él, que trabaja mejor a altas temperaturas, hecho de gran importancia para células que trabajan en sistemas concentradores de radiación. El GaAs tiene la desventaja sobre el Si de que los defectos cristalinos juegan en él un papel más importante.

- **El fosfuro de indio (InP):** es más difícil de preparar que el GaAs y rinde menos que él.

- **El Teluro de Cadmio (CdTe):** estas células de teluro de cadmio también son de capa ultra-delgada. Están formadas por una capa tipo 'p' del teluro de cadmio, otra capa fina tipo 'n' de CdS, una de óxido conductor transparente (que está conectada con un contacto eléctrico) y un sustrato de vidrio. Es una tecnología en desarrollo pero su fabricación no es difícil. La desventaja es que los materiales son caros, y el cadmio, aunque en estas células no representan ningún peligro, está considerado como tóxico.

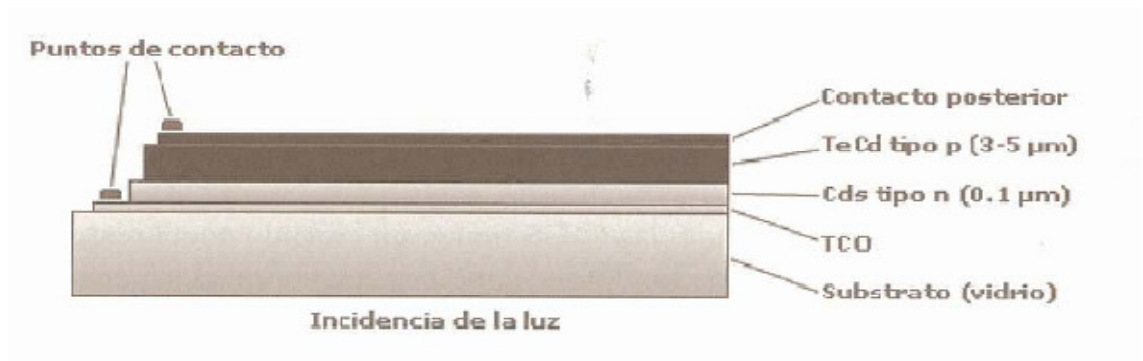


Figura 14: Estructura de las células fotovoltaicas de telurio de cadmio

Se están desarrollando tecnologías de configuración de las células (células de concentración, células de transición, células de capa delgada, células de multicapa), buscando una mejora del rendimiento.

5.4.1.4 Características típicas de las células solares

Superficie activa:

Se define la superficie activa como la parte del área total de la célula fotovoltaica que interviene en el proceso de conversión. En las primeras células que se fabricaban, era bastante común que la conexión a uno de los materiales semiconductores se realizase con distintos trozos metálicos en la parte frontal (el área expuesta al sol). Este proceso trae consigo una disminución del área activa de la célula, en la actualidad hay modelos de célula que se construyen de modo que el conexionado entre la zona -p y la zona-n del semiconductor se realiza en la parte posterior de la célula. Gracias a este proceso de fabricación se consigue incrementar el área activa de la célula, son necesidad de aumentar la superficie total de la misma.

Material antireflectante

De no ser tratada, la superficie del material semiconductor que está expuesta a la luz incidente tiende a reflejar una porción de la misma, disminuyéndola cantidad de energía luminosa que puede llegar al par semiconductor. Para evitar esta pérdida, el fabricante deposita una finísima capa de material anti reflectante.

Forma geométrica y dimensiones

El método de fabricación determina la forma geométrica de la célula fotovoltaica.

Los primeros modelos que se realizaron tenían forma circular. Actualmente las células que se fabrican poseen forma cuadrada, ya sean con los vértices redondeados o con esquinas a 90°.

En los modelos de mercado, generalmente, una célula tiene un grosor que varía entre los 0.25 y los 0.35mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a $12 \times 12 \text{ cm}^2$.

La eficiencia de conversión

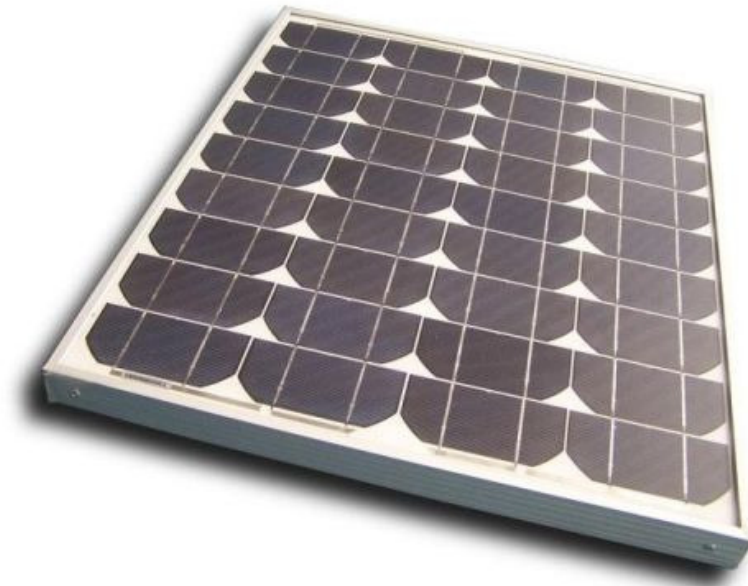
Es la relación entre la energía eléctrica generada y la energía luminosa utilizada para obtenerla. Esta relación es dada en forma porcentual, como se muestra a continuación:

$$\mu = \frac{\text{Energía_Generada}}{\text{Energía_Incidente}} \times 100$$

En la actualidad, las células fotovoltaicas producidas a escala industrial tienen una eficiencia de conversión que oscila entre un 11 y un 16%. El valor teórico máximo para la eficiencia de una célula fotovoltaica que responde solamente a un rango reducido del espectro luminoso, es de alrededor del 25% al 28%, dependiendo del material semiconductor.

Las células fotovoltaicas que utilizan semiconductores monocristalinos tienen una eficiencia mayor a las que emplea el semiconductor policristalino, debido a que las imperfecciones en la estructura de este último disminuyen el número de pares de carga que quedan libres para conducir la corriente.

5.4.2 El panel fotovoltaico



También llamados módulos o colectores. Una sola célula fotovoltaica genera una corriente muy baja (1.1-1.7 V), es necesario unir varias de ellas en serie para poder alcanzar un cierto voltaje. Los paneles solares son la unión de células fotovoltaicas en serie, encapsuladas para protegerlas y con un marco metálico para su montaje.

Los paneles son las unidades básicas de los sistemas de generación de electricidad a partir de la energía solar.

El armazón de los módulos debe ser a la vez resistente y ligero. Se suele fabricar de aluminio con resinas para hacerlo hermético.

La cubierta del panel suele ser de cristal templado, resistente impactos, transparente, dejando pasar las radiaciones solares (en más de un 92 %).

Los paneles solares fotovoltaicos se deben orientar al sol, según la hora del día, mes del año y lugar geográfico, si se dispone de sistemas de inclinación variable. Cuando los paneles son fijos se escoge una orientación media, la más adecuada para la zona. Por ejemplo, en España se suele escoger una orientación sur, con una inclinación de 40-45 grados, según zonas. La inclinación fija tiene unos costes inferiores a la variable.^v

Los paneles se deben instalar en zonas sin sombras. Tampoco se debe hacer sombra entre ellos. Hay que mantenerlos siempre limpios de hojas, ramas, polvo suciedad, etc. Su fijación al suelo debe ser firme, ya que tienen que permanecer fijos en el sitio más de 25 años (su vida útil).

Tabla 2: Características principales de un modelo de panel fotovoltaico

<i>Módulo fotovoltaico monocristalino de 60 células con potencias desde 223 a 233W_p</i>
Aplicación: instalaciones conectadas a la red
Eficiencia máxima: 14.4 %
Garantía 5 años en materiales, 90% de la potencia 10 años y el 80% de la potencia de salida en 25 años.
Producto certificado por TÜV
Dimensiones: 990 x 1.640 mm ²
Espesor (con marco): 40 mm
Peso: 19 kg
Tensión máxima de sistema: 1.000 V cc
Temperatura de trabajo: -40 a + 85 °C
Toma de tierra: bastidor con dos taladros bypass para la toma de tierra
Caja de conexión: IP-65 con diodos bypass de protección
Cables de salida: longitudes de cables simétricas de 1,0 m, S=4mm ² , doble capa aislante, libre de halogenuros y resistente a la radiación.

5.4.2.1 Composición y geometría del panel

Las células solares constituyen un producto intermedio: proporciona valores de tensión y corriente limitados en comparación a los requeridos normalmente por los aparatos usuarios, son extremadamente frágiles, eléctricamente no aisladas y sin un soporte mecánico. Se ensamblan de la manera adecuada para formar una única estructura: el panel fotovoltaico, que es una estructura sólida y manejable.

El número de células en un panel, y por lo tanto su voltaje de salida, depende de la estructura cristalina del semiconductor usado. Los paneles pueden tener diferentes tamaños: los más utilizados están formados por 40-80 células conectadas eléctricamente en serie, con una superficie que oscila entre los 0.8m² a los 2m². Las células están ensambladas entre un estrato superior de cristal y un estrato inferior de material plástico (Tedlar). El producto preparado de esta manera se coloca en un horno de alta temperatura, con vacío de alto grado. El resultado es un bloque único laminado en el que las células están “ahogadas” en el material plástico fundido. Luego se añaden los marcos, normalmente de aluminio; de esta manera se confiere una resistencia mecánica adecuada y se garantizan muchos años de funcionamiento. En la parte trasera del módulo se añade una caja de unión en la que se ponen los diodos de by-pass y los contactos eléctricos.

Cuando la forma geométrica de las células es cuadrada, la superficie del panel será la mínima para un número dado de células, ya que el espacio entre ellas es prácticamente nulo. Esto permite la realización de un panel de menor tamaño, lo que abarata algo el costo del mismo y el de su transporte. Un panel de menor tamaño minimiza la superficie para satisfacer la carga del sistema, reduciendo la superficie

expuesta al viento. Los paneles modernos tienen células cuadradas (o con esquinas redondeadas), los más antiguos tienen células circulares.



Figura 15: Panel moderno de célula cuadrada



Figura 16: Panel antiguo de célula redonda

Los detalles del ensamblado mecánico de un panel varían con cada fabricante. A pesar de ello existen puntos comunes para todas las configuraciones. Para evitar quebrarlas células fotovoltaicas, estas son protegidas adhiriendo a las mismas dos capas de sostén. El montaje deja a las células en el medio de una estructura “sándwich”, con dos capas plásticas de protección, una en la parte superior (translúcida y con protección a los rayos ultra-violetas), la que se expone a la luz solar. La inferior contribuye a incrementar la rigidez del “sándwich”, proveyendo, asimismo, una capa dieléctrica (aislante). En frente del panel tiene un vidrio templado (resistente

al impacto) que protege a las células de los agentes meteorológicos (lluvia, granizo, nieve, polvo) y los golpes. El vidrio usado tiene un bajo contenido de lomo, para no reducir la transmisión de la luz a través del mismo. Para dar rigidez mecánica al conjunto y facilitar el montaje del panel a un soporte de sostén el perímetro del panel tiene un marco metálico de aluminio el que evita la oxidación destructiva. El marco viene pre-perforado, haciendo innecesario el uso de máquinas de perforar, lo que evita el riesgo de dañar accidentalmente el panel fotovoltaico.

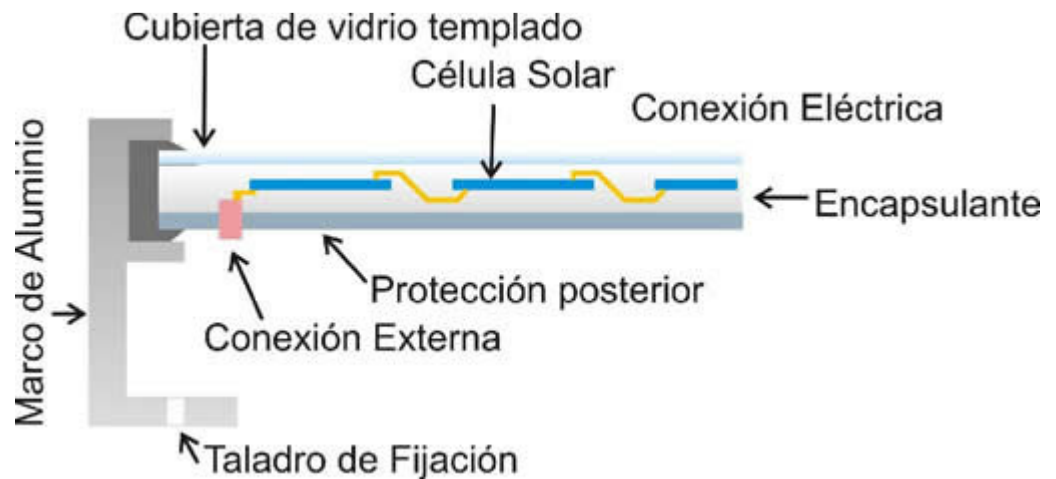


Figura 17: Composición panel solar

EL PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

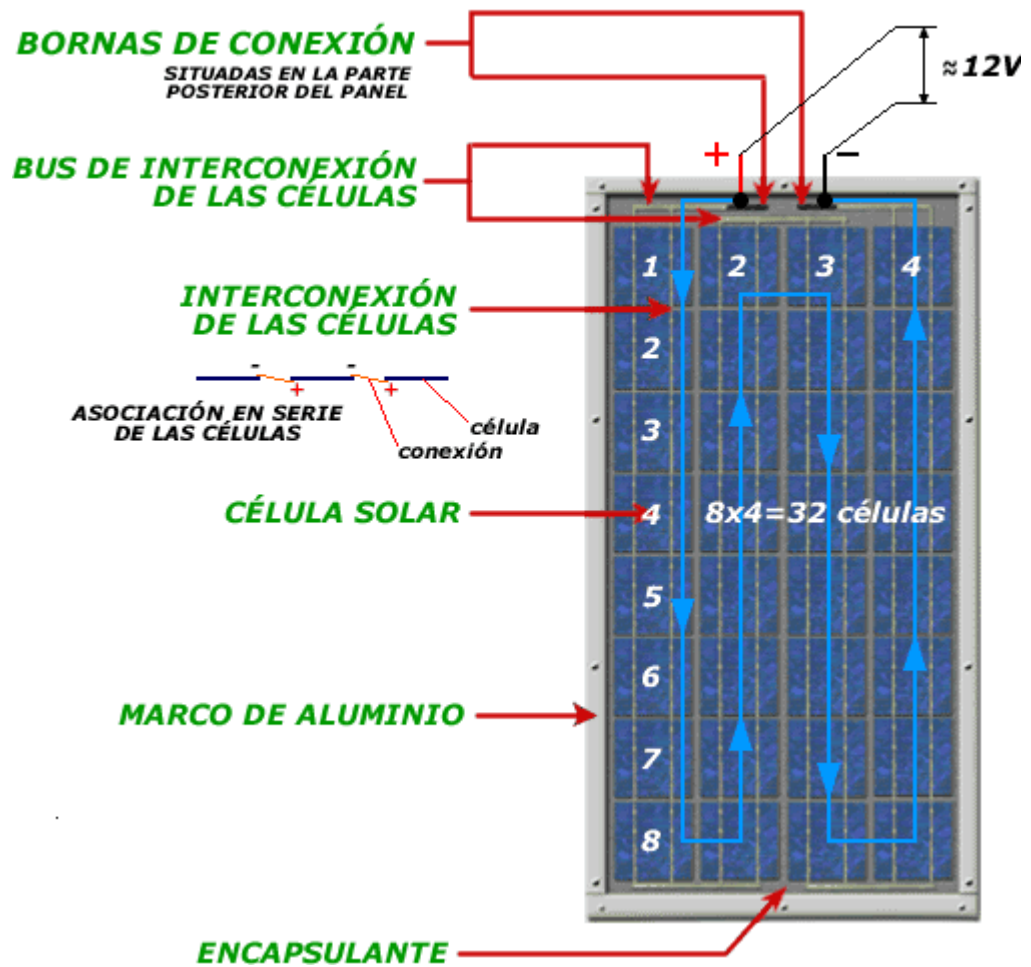


Figura 18: Configuración Panel solar fotovoltaico

En la parte trasera del panel se encuentran los contactos eléctricos. Las versiones más modernas tienen una caja de plástico, con tapa removible y agujeros laterales para la entrada y salida de los cables de conexión. Tanto la tapa como los agujeros laterales están diseñados para brindar protección ambiental y permitir un mejor anclado mecánico para los cables de conexión. Dentro de la caja se hallan dos bornes de salida. El terminal positivo tiene el símbolo (+), o una marca de color rojo; el negativo tiene el símbolo (-), o una marca de color negro.

5.4.2.2 Características eléctricas

Potencia máxima de salida:

La potencia máxima de salida de un panel fotovoltaico es la característica más importante del mismo. Salvo en casos de muy bajo consumo, la implementación de un sistema fotovoltaico requiere el uso de paneles con potencias de salida de 30 o más vatios. Paneles con

potencias por debajo de 30W no ofrecen una solución práctica, ya que la diferencia en costo no es suficiente para justificar el mayor número de paneles requeridos. Los módulos formados tienen una potencia que varía entre los 50W y los 250Wp, según el tipo y la eficiencia de las células que lo componen.

Curvas I-V:

Si los valores de potencia luminosa y la orientación del panel permanecen constantes, la corriente de salida de un panel fotovoltaico varía con el valor del voltaje en la carga y su temperatura de trabajo. Esto se debe a las características intrínsecas de los materiales semiconductores. La Figura 19 muestra la relación existente entre la corriente y el voltaje de salida para un panel fotovoltaico (curva I-V), para tres temperaturas de trabajo, cuando el nivel de radiación permanece constante. El valor máximo para el voltaje de salida correspondiente a un valor de corriente nulo (voltaje a circuito abierto), mientras que el valor máximo para la corriente corresponde a un voltaje de salida nulo (salida cortocircuitada). Todas las curvas tienen una zona donde el valor de la corriente permanece prácticamente constante para valores crecientes de voltaje de salida, hasta alcanzar una zona de transición, a partir de esta zona, pequeños aumentos en el voltaje de salida ocasionan bruscas disminuciones en el valor de la corriente de salida. El comienzo de la zona de transición se alcanza para menores valores del voltaje de salida cuando la temperatura de trabajo incrementa.

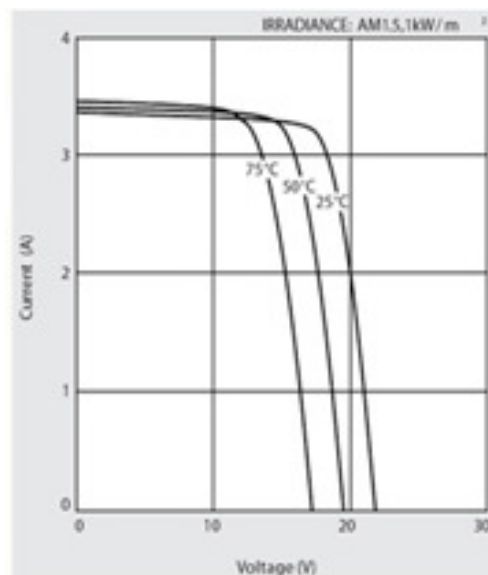


Figura 19: Curva de potencia de panel fotovoltaico

Intensidad.

La intensidad de corriente que genera el panel aumenta con la radiación, permaneciendo el voltaje aproximadamente constante.

En la Figura 20 para unas condiciones de temperatura constante, como las curvas I-V de un panel varían por incidencia de la relación. En las curvas puede apreciarse como la incidencia de la radiación afecta mucho más a la intensidad.

Tiene mucha importancia la colocación de los paneles (su orientación e inclinación respecto a la horizontal), ya que los valores de la radiación varían a lo largo del día en función de la inclinación del sol respecto al horizonte.

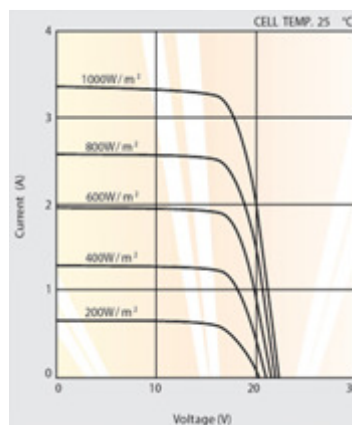


Figura 20: Curva I-V para distintos tipos de radiación

Efecto de la temperatura:

El aumento de temperatura en las células supone un incremento en la corriente, pero al mismo tiempo una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. Esto implica que tanto la corriente de cortocircuito como el voltaje a circuito abierto se ven afectados por la temperatura de trabajo, aunque el tipo de variación así como su magnitud porcentual son distintos para estos dos parámetros.

Si tomamos como referencia los valores a 25 °C, la corriente de cortocircuito aumenta moderadamente (del orden de un 1% a 50°C pero un 3% a 75°C), mientras que el voltaje a circuito abierto disminuye sensiblemente (aproximadamente 8% a 50°C pero cerca de un 15% a 75°C).

La potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo.

Una radiación de 1000 W/m^2 es capaz de calentar unos 25 grados por encima de la temperatura del aire circulante, lo que reduce la tensión, y por lo tanto la potencia en un factor superior al 10-12%.

Es importante colocar los paneles en un lugar en el que estén bien aireados.

El efecto que tiene la temperatura en los paneles fotovoltaicos se estudiará en unos apartados más adelante, debido a la importancia que tiene este en el rendimiento y en las pérdidas de dicho panel.

Temperatura de trabajo del panel:

La temperatura de trabajo alcanza un panel FV obedece una relación lineal dada por la expresión:

$$T_t = T_a + k * R$$

Donde:

- T_t es la temperatura de trabajo del panel,
- T_a es la máxima temperatura ambiente
- R es el valor de la radiación solar en W/m^2 ,
- k es el coeficiente que varia entre 0.02 y $0.04^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$, dependiendo de la velocidad promedio del viento.

Cuando ésta es muy baja, o inexistente, el enfriamiento del panel es pobre o nulo, y k toma valores cercanos o iguales al máximo (0.04). si la velocidad promedio del viento produce un enfriamiento efectivo del panel, el valor de k será el mínimo (0.02).

El valor de R varía entre 800 y 1000 W/m^2 .

Para localizaciones con alto valor de insolación diaria es una el valor máximo. Si existen nubes pasajeras que reducen el valor de irradiación, el calor de R se reduce a 800 W/m^2 .

El producto kR representa el incremento de temperatura que sufre el panel sobre la máxima temperatura ambiente.

El primer paso en el cálculo de la potencia de salida de un panel fotovoltaico trabajando a una temperatura mayor que los 25°C , es determinar los valores de radiación solar y ambiental para la zona en que éste será usado.

Máxima potencia de salida:

Para cada condición de trabajo se puede calcular la potencia de salida del panel multiplicando los valores correspondientes al voltaje y la corriente para ese punto de la curva I-V. La potencia de salida es nula para dos puntos de trabajo: circuito abierto y cortocircuito, ya que la corriente o el voltaje de salida es nulo. Si la salida de un panel es cortocircuitada, este no sufre daño alguno.

Entre esos dos valores nulos, la potencia de salida alcanza un valor máximo que varía con la temperatura. El valor máximo que corresponde a una temperatura de trabajo de 25°C se denomina “valor óptimo” o “valor pico” (W_p) del panel. Para determinarlo, se usan los denominados valores estándar STC:

- Radiación solar= 1000 W/m²
- Temperatura = 25°C
- Espectro luminoso= 1.5 masa de aire

Los valores de voltaje y corriente asociados con este máximo (V_p e I_p) son los dados en la hoja de especificaciones para el panel. La Figura 21 muestra la potencia máxima en función de la temperatura de trabajo. Estos están ubicados al comienzo de la zona de transición de la curva I-V para la temperatura en consideración.

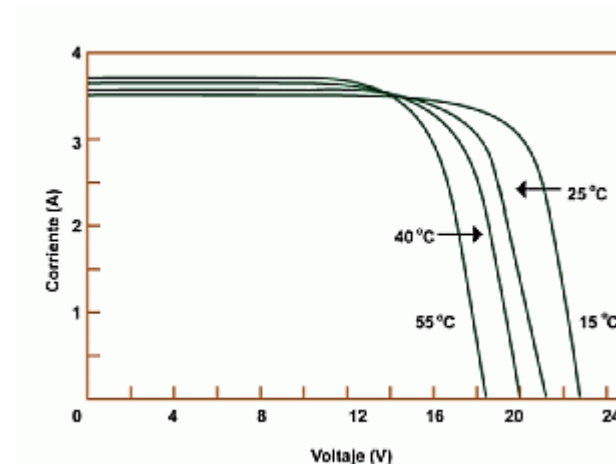


Figura 21: Curva de potencia del panel

El W_p (watio pico) es la unidad de medida de referencia utilizada para los módulos fotovoltaicos. Expresa la potencia eléctrica suministrable por el módulo en las condiciones estándar de referencia STC.

Factor de degradación:

La mayoría de los paneles fotovoltaicos, cuando la temperatura de trabajo aumenta, el valor de la potencia de salida disminuye. En la práctica, debido a la disipación de calor dentro de las células del panel, salvo en climas muy fríos, la temperatura de trabajo va a exceder siempre de los 25°C, y cuando ello ocurre, la potencia de salida nunca alcanza el valor pico específico por el fabricante.

El diseño de un sistema fotovoltaico debe tener en cuenta esta degradación del panel, a fin de asegurar que los requisitos eléctricos del sistema pueden ser satisfechos los días más calurosos del verano.

Para el periodo invernal, si el mínimo para la temperatura promedio es menor a los 25°C, no se considera ninguna degradación para la potencia de salida pico.

La degradación puede ser calculada usando los valores dados por las curvas I-V a alta temperatura, pero este proceso es tedioso e impreciso. Es mucho más conveniente usar factores de degradación dados en forma porcentual con relación a la potencia pico. De este modo, los fabricantes suelen aportar en las especificaciones técnicas del panel un factor de degradación, o de pérdidas, en términos de pérdida porcentual de potencia máxima por °C. Incluso, en algunos casos el fabricante facilita información sobre coeficientes de pérdidas no solo en términos de disminución de potencia por variación de la temperatura de trabajo, sino también para la intensidad en cortocircuito frente a temperatura y de pérdida de tensión en circuito abierto frente a temperatura.

Evaluación de la potencia de salida:

Una vez conocido este el valor de la temperatura de trabajo del panel puede determinarse el valor de potencia de salida. Para ello se utiliza la expresión siguiente:

$$P_t = P_p - (P_p * \delta * \Delta T)$$

Donde:

- P_t es la potencia de salida a la temperatura de trabajo T_t ;
- P_p es la potencia pico del panel (25 °C);
- Δ es el coeficiente de degradación
- Es el incremento de temperatura $\Delta T = T_t - 25^\circ\text{C}$

5.4.3 El generador fotovoltaico

Un conjunto de modulo o paneles conectados eléctricamente en serie, forman lo que se denomina “ramal”. Más ramales conectados en paralelo, para obtener la potencia deseada, constituye el generador fotovoltaico. Así el sistema eléctrico puede proporcionar las características de tensión y de potencia necesarias para las diferentes aplicaciones.



Figura 22: Generador fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos que forman el generador, están montados sobre una estructura mecánica, capaz de sujetarlos, orientada para optimizar la radiación solar. Esta estructura de sustentación puede ser fija o móvil, de manera que busque con su movimiento incrementar la irradiación incidente sobre el conjunto de paneles. La cantidad de energía producida por un generador fotovoltaico varía en función de la insolación y de la latitud del lugar. Si la estructura es móvil la energía generada podrá incrementarse sensiblemente.

La producción de energía fotovoltaica, al depender de la luz del sol, no es constante, sino que está condicionada por la alternancia del día y de la noche, por los ciclos de las estaciones y por la variación de las condiciones meteorológicas. El generador fotovoltaico proporciona corriente eléctrica continua y este es un factor a tener en cuenta si la que se pretende es suministrar electricidad a aparatos que consumen en corriente alterna o conectar la instalación fotovoltaica a la red de distribución. Que para cada aplicación, el generador tendrá que ser dimensionado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Carga eléctrica demandada
- Potencia de pico
- Posibilidad de conexión a la red eléctrica

- Latitud del lugar y radiación solar media anual del mismo
- Características arquitectónicas específicas del edificio o terreno
- Características eléctricas específicas de la carga

5.4.4 Las estructuras soporte

5.4.4.1 Tipos

La estructura soporte será la encargada de mantener a los módulos en la intemperie.

El diseño de la estructura se realizara para la orientación y el ángulo de inclinación especificado para generador el fotovoltaico y teniendo en cuenta la facilidad de montaje y desmontaje, y la posible necesidad de sustituciones de elementos. En su diseño se debe garantizar que:

- Los módulos se encuentran ubicados de modo óptimo de cara a maximizar la generación de energía eléctrica a lo largo de todo el año, en que se refiere a orientación, inclinación y ausencia de sombras, en el caso de Estructuras Fijas.
- Los módulos se soportan sobre un elemento móvil de manera que en cada momento se sitian en la posición óptima para que la irradiación recibida será máxima, en el caso de Estructuras Móviles.

Estructuras fijas:

Puede optarse por ubicar los paneles en una estructura fija, con una orientación e inclinación optima. (La orientación ideal es Sur).

Debido al cambio de posición del sol durante el año, la inclinación ideal de los colectores varía en función de la latitud en el cual nos encontramos (41°). Normalmente se utilizan 30° sur en fotovoltaica, pero la inclinación puede variar en función de la aplicación, criterios de uso e integración arquitectónica, en $\pm 10^\circ$.

Estructura con seguimiento solar:

Para aumentar la producción eléctrica del sistema se puede dotar al panel (conjunto de módulos) fotovoltaico de movimiento, de modo que siga la trayectoria del sol desde el amanecer hasta el atardecer.

Podemos disponer de una sistema que, con la inclinación optima gire en un eje para seguir el movimiento del Sol desde el amanecer hasta el ocaso, en este casi tendremos un sistema de seguimiento polar en un eje.

Podemos disponer de un sistema que, con la orientación óptima, haga variar la inclinación del panel para que los rayos solares incidan cada día de modo perpendicular a su superficie. En ese caso tendremos un sistema de seguimiento acimutal en un eje.

Podemos disponer de un sistema que busque que en cada momento la inclinación y orientación será la que maximice la irradiación, haciendo que la superficie de los paneles se encuentre siempre perpendicular a los rayos solares. Se trata de un sistema de seguimiento de dos ejes.

Con un sistema de seguimiento de dos ejes el sistema solar se mantiene perpendicular a la trayectoria de los rayos solares, ya que su inclinación es variable respecto a la horizontal, y gira alrededor de un eje vertical.

Se puede conseguir del orden de un 40% más de producción eléctrica que en un sistema convencional estático, dependiendo de las condiciones particulares de la ubicación.

5.4.4.2 Requisitos

La estructura soporte de los módulos debe ser capaz de resistir, con los módulos instalados, las sobrecargas del viento y nieve, de acuerdo con lo indicado en la normativa básica de la edificación NBE-AE-88.

En lo que se refiere al diseño y la construcción de la estructura y el sistema de fijación de módulos, el proyectista deberá asegurarse de que es capaz de soportar las necesarias dilataciones térmicas, sin que se transmitan cargas que pueden afectar a la integridad de los módulos. La estructura se protegerá superficialmente contra la acción de los agentes ambientales. La realización de taladros en la estructura se llevara a cabo antes de proceder, en su caso, al galvanizado o protección de la estructura.

Los puntos de sujeción para el módulo fotovoltaico serán suficientes en número, teniendo en cuenta el área de apoyo y posición relativa, de forma que no se produzcan flexiones en los módulos superiores a las permitidas por el fabricante y los métodos homologados para el modelo del módulo.

La tornillería realizada en acero inoxidable cumpliendo la norma MV-106. En el caso de ser la estructura galvanizada se admitirán tornillos galvanizados, exceptuando la sujeción de los módulos al mismo que serán de acero inoxidable.

En el caso de instalaciones en cubierta que hagan las veces de la cubierta del edificio, el diseño de la estructura y la estanqueidad entre los módulos se ajustaran a

las exigencias de las Normas Básicas de la Edificación y a las técnicas usuales en la construcción de cubiertas.

Se dispondrán las estructuras soporte necesarias para montar los módulos tanto sobre superficies plana (terraza) como integrados sobre tejado minimizando el efecto del sombreado. Se incluirán todos los accesorios y bancadas y/o anclajes.

Si está construida con perfiles de acero laminado conformado en frío deberá cumplir la Norma MV-102 para garantizar todas las características mecánicas y de composición química.

Si es del tipo galvanizada en caliente cumplirá las normas UNE 37-501 y UNE 37-508, con un espesor mínimo de 8µm para eliminar las necesidades de mantenimiento y prolongar su vida útil.

5.4.4.3 Los cables de conexión

El cable de conexión representa el componente indispensable para el transporte de la energía eléctrica entre los diferentes bloques que integran un sistema fotovoltaico.

Resulta inevitable que parte de esta energía se pierda en forma de calor, a que la resistencia eléctrica de un conductor nunca es nula. El material más indicado para la fabricación de un cable conductor representa un compromiso entre un bajo valor de resistencia y el coste del mismo.

El cobre ofrece hoy día la mejor solución, a no ser que sea necesario minimizar las pérdidas en conducciones en las que circula una intensidad de corriente muy alta, casi en el que se podrá optar por el aluminio, metal que si bien tiene una conductividad eléctrica del orden del 60% de la del cobre es, sin embargo, un material más ligero, lo que favorece su empleo en líneas de transmisión de energía eléctrica.

La resistencia eléctrica de un material conductor está dada por la expresión:

$$r = \frac{\rho * L}{A}$$

La expresión anterior indica que para un material conductor dado y temperatura (r constante), si el valor del área A permanece constante, el valor de la resistencia aumenta con su longitud. De igual manera puede deducirse que si r y L permanecen fijos, la resistencia del conductor se reduce si el área de su sección aumenta. La mayoría de los cables utilizados en instalaciones eléctricas tienen una sección circular. Cuando el área del conductor aumenta, también lo hace su diámetro.

Por lo tanto, para una longitud determinada, un aumento en el diámetro significa una menor caída de voltaje en el cable (menores pérdidas de energía), pero un mayor costo (más volumen por unidad de longitud).

En el diseño del cableado se deben tener en cuenta las caídas de tensión producidas en los conductores debido a la resistencia de los mismos. Para ello las secciones de estos conductores deben calcularse en función de la máxima potencia de pérdidas admisibles para la instalación.

En el caso de los sistemas fotovoltaicos, para cualquier condición de trabajo, los conductores de la parte de corriente continua deberán tener la sección suficiente para que la caída de tensión sea inferior de 1,5% y los de la parte de corriente alterna para que la caída de tensión sea inferior del 0,5% teniendo en cuenta en ambos casos como referencia las correspondientes a cajas de conexiones.

Debe respetarse lo reglamentado por el REBT 2002 (Reglamento Electrotécnico de baja tensión).

5.4.5 El inversor

5.4.5.1 Necesidad del inversor

En un sistema fotovoltaico con conexión a la red eléctrica, la potencia en corriente continua (DC) generada por el equipo fotovoltaico debe convertirse a corriente alterna (AC) para poder ser inyectada en la red eléctrica. Hay que tener en cuenta que la mayoría de los aparatos modernos (televisores, ordenadores, hornos microondas, etc.) funcionan con corriente alterna. Este requisito hace imprescindible la utilización de un inversor que convierta corriente continua en corriente alterna.

Los inversores utilizados en sistemas fotovoltaicos serán del tipo conexión a la red eléctrica con una potencia de entrada variable para que sea capaz de extraer en todo momento la máxima potencia que el generador fotovoltaico puede proporcionar a lo largo de cada día.

Estos inversores deben llevar protección contra sobrecarga del sistema, exceso de temperatura, batería baja o inversión de polaridad.

5.4.5.2 Tipos de inversores

Actualmente existen dos grandes grupos de inversores, los autos conmutados y los conmutados de línea.

Los inversores conmutados de línea usan interruptores basados en tiristores, que son dispositivos electrónicos de potencia que pueden controlar el tiempo de

activación de la conducción, pero no el tiempo de parada, para detener la conducción precisan de una fuente o circuito adicional que reduzca hasta cero la corriente que lo atraviesa. La gran mayoría de los inversores usados actualmente en aplicaciones con fuentes de energía distribuida, como la fotovoltaica, son inversores autoconmutados.

Los inversores autoconmutados se dividen en inversores en fuente de corriente y en inversores en fuente de tensión. Actualmente los inversores tradicionales de dos niveles son los únicos fabricados para aplicaciones estrictamente fotovoltaicas.

5.4.6 La batería

5.4.6.1 La batería de Pb-ácido

Dentro de los distintos tipos de baterías eléctricas, destaca los acumuladores de Pb-ácido, que presenta numerosas aplicaciones. Su interés se reduce a dos de ellas.

- ii. Las baterías para automóviles
- iii. Las baterías para sistemas fotovoltaicos (baterías solares)

Como la diferencia en el coste de estas dos versiones es apreciable, existe siempre la tentación de usar la batería más económica (automóvil) en un sistema fotovoltaico.

Para apreciar porque una batería solar representa la solución más adecuada, se puntualizara las diferencias entre las dos.

El modelo de batería usado en los automóviles está diseñada para sostener corrientes elevadas (200 a 350A) por muy breves instantes (segundos) durante el arranque del motor. El resto del tiempo la batería está siendo cargada o permanece inactiva.

La batería de un sistema solar, por el contrario, debe ser capaz de sostener corrientes moderadas (una decena de amperios) durante horas.

Además, deberá permanecer activa sin recibir carga (servicio nocturno). Los periodos de reposo son nulos, ya que está siendo cargada y descargada. Diferentes requerimientos de uso solo pueden satisfacerse con diseños distintos.

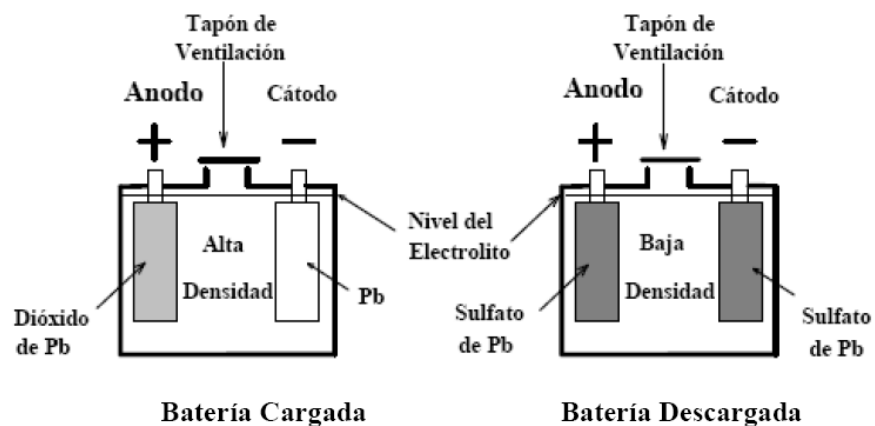


Figura 23: la batería de Pb-ácido

Las placas de una batería de Pb-ácido para automóvil están hechas con plomo esponjoso. Esta técnica de fabricación hace posible el obtener un máximo de superficie activa con un mínimo de peso. La reducción en la cantidad de plomo contribuye, en forma sustancial, a abaratar su costo. El incremento de la superficie activa disminuye la densidad de corriente (A/cm^2), permitiendo alcanzar niveles muy altos para la corriente de carga, por breves instantes.

Las baterías de automóvil tienen electrodos con aleación de calcio lo que contribuye a minimizar la gasificación durante la carga. Esto hace que se reduzca la pérdida de agua en el electrolito. El agregado de esta aleación disminuye las pérdidas por autodescarga, permitiendo la retención de la carga durante largos periodos de inactividad.

Los electrodos de una batería solar tienen una aleación de antimonio, la que permite adherir una mayor cantidad de material activo. El envejecimiento de una batería se produce por la pérdida de este cuando la batería es descargada. Celdas con mayor cantidad de material activo tienen una más larga duración y profundidad de descarga. El incremento del material activo aumenta el costo y el peso de la batería.^v

La presencia de antimonio incrementa las pérdidas de autodescarga. Su una batería solar permanece en almacenamiento, desde ser cargada con frecuencia. Como la presencia de antimonio incrementa la gasificación, la corriente de carga en un sistema fotovoltaico debe tener un régimen variable.

Dos características identifican a una batería solar: la mayor profundidad de descarga (PD) y un alto valor para el ciclaje. La batería de automóvil está diseñada para soportar un leve PD.

Se considera que una BCP ha completado todo los ciclos de carga y descarga cuando, al ser cargada nuevamente, la máxima energía que puede almacenar se

reduce al 80% de su valor inicial. El número de ciclos de carga/descarga depende de la PD. Cuando esta disminuye, el número de ciclos aumenta. Para una dada PD, la batería más robusta proporciona el mayor número de ciclos.

Los modelos con mayor aceptación son las de 6 y 12V nominales. Baterías de 6V, con una capacidad de unos 200Ah, son utilizadas en sistemas de pequeña capacidad de reserva, donde pasan a formar parte de un banco de baterías con conexión serie o serie-paralelo, a fin de satisfacer los valores de voltaje y corriente del sistema. Este versión ofrece el mejor compromiso entre peso (facilidad de manejo) y numero de Ah de reserva. Como los sistemas fotovoltaicos de bajo consumo son sistemas de 12V nominales, los requerimientos de reserva pueden ser satisfechos con la versión de 12V, la que tiene una capacidad de unos 100Ah. Baterías de más de 250Ah resultan convenientes cuando se trabaja con sistemas de alto consumo. Se fabrican asimismo baterías de cuco profundo con capacidad de reserva mucho más grandes.

Un modelo de 24V, diseñado para ser usado e un sistema mayor (varias casas conectadas a un sistema fotovoltaico) tiene una capacidad de 1.496Ah y pesa 1.200Kgs.

La capacidad de almacenamiento de una batería d Pb-ácido varía con la temperatura del electrolito, lo que, en la práctica, está determinada por la temperatura ambiente del lugar donde ésta será instalada. La siguiente tabla muestra esta interdependencia:

Temperatura (°C)	Capacidad (%)	Eficiencia
30	105	1,05
25	100	1,00
16	90	0,90
4	77	0,77
-7	63	0,63
-18	49	0,49

El aumento en la eficiencia total obtenido a 30°C está relacionado con una reducción drástica de la vida útil de la batería. Cuando se usan baterías de Pb-ácido es importante mantener la temperatura del electrolito cercana a los 25°C, ya que a esa temperatura se alcanza el balance óptimo entre la eficiencia y la vida útil de este componente.

Se ha dicho anteriormente que el agregado de antimonio incrementa la autodescarga de las baterías solares. Cuando la temperatura ambiente es de 50°C la batería se descargara totalmente en un mes (25%/semana). Cuando la temperatura ambiente es cercana a los 25°C la autodescarga se reduce a un 6%/semana (4meses para una descarga total). Estas cifras muestran que si una batería de este tipo permanece en depósito por largo tiempo, deberá ser recargada con frecuencia. Las baterías de automóvil con aleación de calcio (baterías de mantenimiento nulo) tardan un año en perder el 50% de su carga, a 25°C.

Existe una batería solar de Pb-ácido donde el electrolito no es líquido sino gelatinoso. Su coste es alrededor de tres veces mayor que el de la versión con electrolito líquido, pero tiene características técnicas que la hacen muy útiles en aplicaciones especializadas. Como esta batería no requiere ventilación al exterior durante el proceso de carga, la caja exterior es hermética. La válvula constituye un dispositivo de seguridad en caso de cortocircuito o sobrecarga.

Esta hermeticidad evita el derrame del electrolito, lo que disminuye el riesgo en su manejo, y la convierte en la solución ideal para instalaciones marinas. Como no requieren mantenimiento, se las usa en instalaciones donde la supervisión es infrecuente o nula, como es el caso en sistemas fotovoltaicos de iluminación de carteles de publicidad en carreteras, repetidores de comunicaciones, o en sistemas fotovoltaicos portátiles.

El tipo de electrolito usado en esta batería permite su uso a bajas temperaturas con mayor eficiencia que las de electrolito líquido. La autodescarga semanal es de 1,1% a 25°C y aumenta a un 3% cuando la temperatura se eleva a 40°C. Pueden obtenerse en versiones de 12 y 24V, con capacidades entre 6 y 180Ah (20hrs).

5.4.6.2 La batería de Ni-Cd

Este tipo de batería es de ciclo profundo. Debido a su alto costo inicial (6 a 8 veces el de una batería equivalente de Pb-ácido), este diseño no ha podido suplantar al tipo Pb-ácido con electrolito líquido. Sin embargo, el costo operacional (largo plazo) es mucho menos que el de una batería de igual capacidad del tipo Pb-ácido debido a su larga vida útil y bajo mantenimiento.

Existen dos métodos de fabricación para estas baterías, pero el recomendado para una batería solar es el llamado de “bolsillo en la placa”.

Este tipo de baterías usa placas de acero inoxidable, las que poseen depresiones donde se coloca el material activo. El electrolito de estas baterías es una solución de agua o hidróxido de potasio, el que requiere una capa de aceite protector, para evitar su oxidación por el oxígeno del ambiente. En términos genéricos, una batería de Ni-Cd que usa este método de fabricación tolera más abusos que su equivalente de Pb-ácido. Sus características más sobresalientes son: pueden soportar, sin daño, cargas y descargas excesivas, así como una mayor profundidad de descarga (cerca del 100%). Tienen una mayor eficiencia con baja temperatura ambiente y soportar, sin problemas, una alta combinación de temperatura y humedad ambiente. Esta última característica la convierte en la solución ideal para climas tropicales. Otras ventajas asociadas con este tipo de baterías es la ausencia de problemas similares al de la “sulfatación” de las placas o la congelación del electrolito.

Una batería de Ni-Cd puede trabajar con bajo estado de carga sin deteriorarse. La autodescarga es inicialmente elevada, pero disminuye con el tiempo, permitiendo largos periodos de almacenamiento con una retención considerable de la carga inicial.

La vida útil es más de dos veces la de una BCP de Pb-ácido. Hay fabricantes de baterías solares de Ni-Cd las garantiza por 20 años.

Dado que ningún componente es perfecto, enumeramos a continuación alguna de las características de la batería de ni-Cd que pueden ser consideradas como inconvenientes en un sistema fotovoltaico

1. Esta es su característica de descarga.
2. Como la resistencia interna de esta batería es diez veces menos que la de Pb-ácido, el voltaje de salida permanece prácticamente constante hasta el momento en que su capacidad de almacenaje de energía se ve agotada. Es entonces cuando este cae en forma vertiginosa. Esta característica no permite al usuario tener un aviso previo, como en el caso de baterías de Pb-ácido, donde la resistencia interna se incrementa con el tiempo, bajando su voltaje de salida en forma continua.
3. Se quiere medir el voltaje de salida, se requiere el uso de un voltímetro que tengo la suficiente resolución y precisión para que la lectura contenga dos decimales significativos, ya que los cambios son muy pequeños.

El electrolito de una batería de Ni-Cd tiene un rol pasivo, solo actúa como transportador de cargas. No existe variación alguna en la densidad del mismo entre carga y descarga, impidiendo el uso de un densímetro. El instrumento más recomendable es un medidor de energía, como el que mide el número de Wh.

El voltaje de una celda o vaso es cercano a 2V cuando la batería está cargada, y disminuye a 1,2V cuando esta descargada. Para obtener voltajes cercanos a los 12V se necesitan más células por batería. Si se usan estas baterías en un sistema fotovoltaico, el control de carga deberá ser elegido de manera que sea compatible con este tipo de baterías. Un medidor de estado de carga diseñado para baterías de Pb-ácido no puede ser utilizado para monitorear este tipo de acumulador.

5.4.7 El regulador de carga

Se necesita este elemento para regular el paso de la electricidad desde los módulos a los puntos de consumo o a la batería, garantizando una larga vida útil para la misma. Hay que tener en cuenta que en las instalaciones solares fotovoltaicas, las baterías están sometidas a ciclos de carga y descarga constantes, por lo que sufren muchos si la regulación no es buena. El regulador controla la tensión (V) y la corriente (I). Da también las siguientes informaciones: indicación de batería cargada totalmente, indicación de batería en proceso de carga y protección contra carga excesiva. Tiene también sensores de temperatura para que la carga se desarrolle correctamente.

El regulador de carga es el dispositivo encargado de proteger a la batería frente a sobrecargas y sobre descargas profundas. Durante la noche el voltaje de salida de los paneles fotovoltaicos es nulo. Al amanecer, atardecer o en días nublados. El nivel de

insolación es bajo y los paneles no pueden cargar las baterías. En este último caso el control de carga cumple un rol pasivo, aislando el banco de acumulación del bloque de generación, evitando su descarga. Cuando la insolación aumenta, el voltaje de los paneles supera al del banco de baterías y el proceso de carga se reanuda. Es entonces cuando el control de carga tiene un rol activo, evitando una gasificación excesiva del electrolito.

La misión del regulador es contrarrestar la inestabilidad de la fuente primaria. Funciona como un servomecanismo, en el que compara el valor deseado en la carga con uno de referencia y efectúa los cambios necesarios para compensar las variaciones de la fuente primaria y las debidas a la carga. Su tiempo de respuesta es finito y su error en la estabilidad es función de la ganancia del bucle de la realimentación. El regulador de tensión controla constantemente el estado de carga de las baterías y regula la intensidad de carga de las mismas para alegar su vida útil. También debe tener la capacidad de generar alarmas en función del estado de dicha carga.

Existen diferentes tipos de reguladores de carga pero que no se van a explicar en este proyecto, debido a que no es el tema del que trata.

5.4.8 Las pérdidas en el sistema fotovoltaico

5.4.8.1 Pérdidas por la temperatura

Es muy conocido que existe una estrecha relación existente entre la temperatura y cualquier sistema basado en la electricidad. Todo lo que tiene relación con la electricidad está sometido a los efectos negativos de la temperatura. En valores porcentuales la pérdida de potencia de un sistema eléctrico es algo considerable, pero si se adopta una visión más amplia y se ve a nivel global, se puede intuir la pérdida de muchos megavatios por efectos de la temperatura.

Los paneles fotovoltaicos son enemigos del calor.

En el panel fotovoltaico se producen unas pérdidas de potencia del orden de un 4 a 50% por cada 10°C de aumento de su temperatura de operación (dicho porcentaje va a depender ligeramente de la tecnología utilizada por el fabricante de la célula).

La temperatura de operación de los módulos depende tanto de los factores ambientales (irradiación, temperatura ambiente y velocidad del viento) como de otros relativos a su ubicación (como son la posición de los módulos o las condiciones de aireación por la parte posterior).

Si comparamos dos ubicaciones en las que las condiciones de irradiación solar incidente sean iguales, en aquella en la que el clima sea más frío, para un mismo sistema fotovoltaico, se producirá más energía.

De cara a minimizar esas pérdidas se deberá intentar:

- iv. Seleccionar equipos con menos coeficientes de pérdidas de temperatura
- v. Seleccionar una ubicación donde sea factible que el panel se refrigere.

La selección de un generador fotovoltaico con sistema de seguimiento aportara unas menores perdidas por temperatura si se compara con un sistema ubicado sobre una estructura fija.

En las instalaciones fotovoltaicas es recomendable situar los paneles en lugares bien ventilados, para paliar los efectos negativos de la temperatura sobre las células fotovoltaicas, también es cierto que se está desaprovechando la anergia en forma de calor que existe en las mismas.

5.4.9 Pérdidas por no cumplimiento de la potencia nominal

A pesar de que los módulos fotovoltaicos se producen mediante un proceso industrial, no son todos idénticos, y que se componen de células fotovoltaicas que son por definición distintas unas a otras.

Esto implica que el valor de la potencia que puede entregar de modo individual, referida a las condiciones estándar de medida va a presentar una distorsión. Para los productos de mercado nos encontramos con que los fabricantes garantizan un valor para la potencia de un modulo tal que esta se encuentra dentro de un margen que oscila desde el $\pm 3\%$ hasta el $\pm 10\%$ sobre su potencia nominal.

Podría ocurrir que si el valor individual de potencia de cada uno de los paneles que se instalen en un sistema fotovoltaico se encuentra dentro de aquellos cuya potencia se encuentra en la banda inferior garantizada por el fabricante, el valor de potencia entregada del sistema sea inferior en hasta un 10% sobre la prevista. Estas pérdidas podrán reducirse empleando paneles con una menor tolerancia en el valor de la potencia entregada.

5.4.9.1 Pérdidas por conexionado

Los paneles fotovoltaicos de una misma serie van a presentar una potencia ligeramente distinta. Las perdidas por conexionado son perdidas energéticas causadas al realizar la conexión entre módulo con distinto valor de potencia.

En la práctica lo que ocurre es que cuando se conecta un conjunto de módulos en serie, se va a producir una limitación sobre la corriente de la serie, ya que el panel que disponga de menos potencia de todos los conectados no va a permitir que circulen más amperios que los máximos que él pueda dar.

Del mismo modo cuando se realice la conexión en paralelo de distintos módulos, el panel de menos potencia limitará la tensión máxima de conjunto, ya que la potencia de un generador fotovoltaico será inferior a la suma de las potencias de cada uno de los módulos que lo componen.

Estas pérdidas por conexión (pérdidas de mismatch) se pueden reducir mediante una instalación ordenada de potencias de los módulos, así como la utilización de diodos de by-pass.

5.4.9.2 Pérdidas por sombreado del generador

Un sistema fotovoltaico de conexión a red suele estar condicionado por la presencia de sombras en determinadas horas del día.

Estas sombras sobre los paneles generan unas pérdidas energéticas causadas por un lado por la disminución de captación de irradiación solar y por otro, por los posibles efectos de mismatch a las que estas puedan dar lugar al afectar a la potencia individual de un panel o a la de un conjunto de paneles del generador fotovoltaico.

5.4.9.3 Pérdidas por polvo y suciedad

Una vez instalado el panel fotovoltaico, en la intemperie, será inevitable que se vaya depositando el polvo y la suciedad sobre la superficie del mismo.

Suponiendo que esta deposición de polvo y suciedad fuese uniforme sobre la superficie del panel, se dará lugar a una disminución en la corriente y la tensión producida por el panel.

Las pérdidas por polvo y suciedad dependen del lugar de la instalación y de la frecuencia de lluvias, puede estimarse por la inspección visual o mediante medidas específicas. Valores típicos anuales son inferiores al 4% para superficies con un grado de suciedad alto.

Pero en la práctica, esto se suma a la aparición de puntos de suciedad localizada que van a dar lugar a un aumento de las pérdidas de mismatch y a las pérdidas por formación de puntos calientes.

5.4.9.4 *Perdidas angulares*

La potencia nominal de un módulo fotovoltaico viene determinada por el fabricante en relación a unas condiciones estándar de medida, además de suponer un valor para la irradiación de $1.000W/m^2$ y $25^{\circ}C$ de temperatura de célula e implican que la incidencia de los rayos solares es perpendicular.

En condiciones de operación del modulo fotovoltaico ocurrirá que ni la incidencia de la radiación es normal, ni el espectro es estándar durante todo el tiempo de exposición.

El hecho de que la radiación solar incida sobre la superficie del panel con un ángulo que no será perpendicular implica unas pérdidas que serán mayor cuanto mayor se aleje el ángulo de incidencia de la perpendicular.

Las pérdidas energéticas anuales por efectos angulares están en el orden del 3 al 4%.

Adicionalmente, estas pérdidas angulares se van incrementar con el grado de suciedad: para dos paneles idénticos con la misma orientación, las pérdidas angulares serán mayores para el panel más sucio y cuando más sucio esté el panel.

5.4.9.5 *Pérdidas espectrales*

Las condiciones estándar en las que se analiza por parte del fabricante el valor de potencia del modulo asumen que el espectro es estándar AM 1.5G. Durante la operación del modulo fotovoltaico nos encontraremos con que el espectro no es estándar durante todo el tiempo de exposición.

La célula fotovoltaica es espectralmente selectiva. Esto quiere decir que la corriente generada es distinta para cada longitud de onda del espectro solar de la radiación incidente.

La variación del espectro solar en cada momento respecto del espectro normalizado puede afectar la respuesta de las células dando lugar a ganancias o pérdidas energéticas.

El efecto espectral puede hacer variar la potencia en un margen del 1%.

5.4.9.6 *Pérdidas por el rendimiento del inversor*

El funcionamiento de los inversores fotovoltaicos se define mediante una curva de rendimiento en función de cuál sea la potencia de operación.

Va a ser muy importante en la fase de diseño del generador fotovoltaico seleccionar un inversor de alto rendimiento en condiciones nominales de operación, hecho que normalmente va a ir ligado a una selección adecuada de la potencia del inversor en función de la potencia del generador. Esto se debe a que la utilización de un inversor de una potencia excesiva en función de la potencia del generador fotovoltaico dará lugar a que el sistema opere una gran parte del tiempo en valores de rendimientos muy bajos, con las consecuentes pérdidas de generación.

Los inversores son uno de los elementos fundamentales en la producción de energía de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

El rendimiento del inversor es el parámetro más representativo de los inversores. Este viene determinado por la utilización o no en el equipo de un transformador de aislamiento galvánico.

5.4.9.7 Pérdidas por rendimiento de seguimiento del punto de máxima potencia del generador

El inversor fotovoltaico va a trabajar conectado directamente al generador, con un dispositivo electrónico de seguimiento del punto de máxima potencia del generador.

Este punto de máxima potencia cambiar con las condiciones ambientales. El dispositivo de seguimiento de los inversores funciona mediante unos algoritmos de control que pueden variar entre diferentes modelos y fabricantes.

Los inversores se van a caracterizar por trabajar con una curva de rendimiento en función de la potencia, de modo que será esencial conseguir el seguimiento del punto de máxima potencia definido como el cociente entre la energía que el inversor es capaz de extraer del generador y la energía que se extraería en un seguimiento ideal.

En condiciones normales de operación se van a producir interferencias sobre la potencia producida por el generador.

En lo que se refiere a los valores de rendimiento del inversor en el seguimiento de máxima potencia, los valores típicos se encuentran en un margen que van desde el 96% en días despejados hasta el 94% en días con presencia de nubes y claros.

5.4.9.8 Pérdidas por caídas óhmicas en el cableado

Tanto en la zona de corriente continua como en la parte de corriente alterna de la instalación se producen unas pérdidas energéticas originadas por las caídas de tensión cuando una determinada corriente circula por un conductor de un material y sección determinados. Estas pérdidas se van a reducir durante la fase de diseño,

mediante un correcto dimensionado, considerando que la sección de los conductores sea suficiente en función de la corriente que por ellos circula.

El proyectista debe considerar que es necesario un equilibrio entre extra coste de la instalación produjo por un incremento en la sección de los cables y la reducción de las pérdidas de potencia en el generador fotovoltaico.

5.4.9.9 Pérdidas por explotación y mantenimiento

Durante la operación de un generador fotovoltaico es necesario realizar una serie de trabajo relacionado con el mantenimiento preventivo de la instalación. Estos trabajo pueden traer consigo en algún caso la parada de elementos clave en la generación de electricidad, como puede ser e inversor. Cuanto mayor sea el tiempo de parada del equipo mayores serán las pérdidas producidas para el sistema.

Se van a producir averías o condiciones de mal funcionamiento en equipos de manera que cuanto mayor sea el tiempo de sustitución o reparación de los equipos, mayor era su incidencia sobre la producción eléctrica.

5.5 Cálculo de una instalación solar fotovoltaica

En el cálculo de una instalación solar fotovoltaica hay que seguir los siguientes pasos:

1. Calcular la demanda media diaria de electricidad. Hay que saber los equipos que se conectarán a la instalación y su consumo. Se debe tener en cuenta tanto los aparatos que funcionan en corriente continua (CC) como los que funcionan con la corriente alterna (AC). Hay que tener en cuenta que la mayoría de los aparatos funcionan modernamente con AC, por lo que para simplificar la instalación, ya solo se consideran esta última. Se puede seguir la siguiente fórmula:

$$(\text{Consumo del aparato 1 x horas conectado} + \dots) * T_c = \text{consumo total}$$

Se ponen todos los aparatos (1,2, 3....n), se multiplican por las horas que estarán conectados (cifras medias) y se multiplica por un factor de corrección (Fc). Este factor compensa las pérdidas de la instalación.

2. Calcular la energía diaria que puede suministrar un modulo. Para ello hay que saber que las radiaciones solares de la zona, las horas de sol, la inclinación y la orientación más adecuadas para el modulo. Se pude aplicar la siguiente fórmula:

Electricidad suministrada por un modulo = potencia del modulo x
Factor regional

En España, ese valor es de 4 Wh como mínimo.

3. Cálculo de los módulos solares fotovoltaicos (FV) necesarios. Podemos aplicar la siguiente fórmula:

$$\text{Módulos FV necesarios} = \text{demanda media diaria (en Wh)} / \text{energía diaria suministrada por el modulo (Wh)}$$

4. Cálculo de las baterías necesarias para la autonomía del sistema. En este caso se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$B = D \cdot A / N \cdot C$$

B Numero de baterías "C", en paralelo,
D demanda de energía diaria (Ah),
A autonomía del sistema (días),
N nivel tolerable de descarga (0,5, 0,8),
C capacidad de la batería (Ah).

La autonomía del sistema es el número de días en que la batería (totalmente cargada al comienzo), puede asegurar un suministro normal, sin necesitar carga.

En aplicaciones domesticas se consideran 2 días como una buena autonomía.

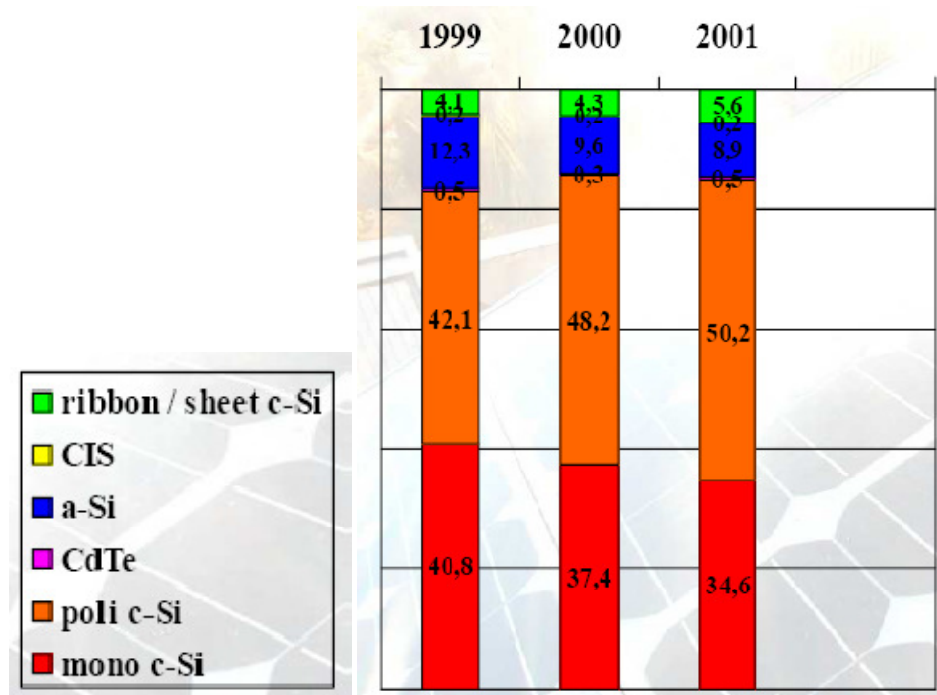
5.6 Fabricación de módulos solares fotovoltaicos

5.6.1.1 Tecnologías de células comerciales

Las tecnologías comerciales de células fotovoltaicas son principalmente 6, que ordenadas de mayor a menor en volumen mundial:

- vi. Silicio policristalino , 50.2%.
- vii. Silicio monocristalino, 34.6%.
- viii. Silicio amorfo, 8.9%.
- ix. Cinta o lamina de silicio cristalino, 5.6%.
- x. Teluro de cadmio (CdTe), 0.5%.
- xi. CIS, 0.2%.

Se puede observar un calor descenso de la tecnología monocristalina a favor de la policristalina

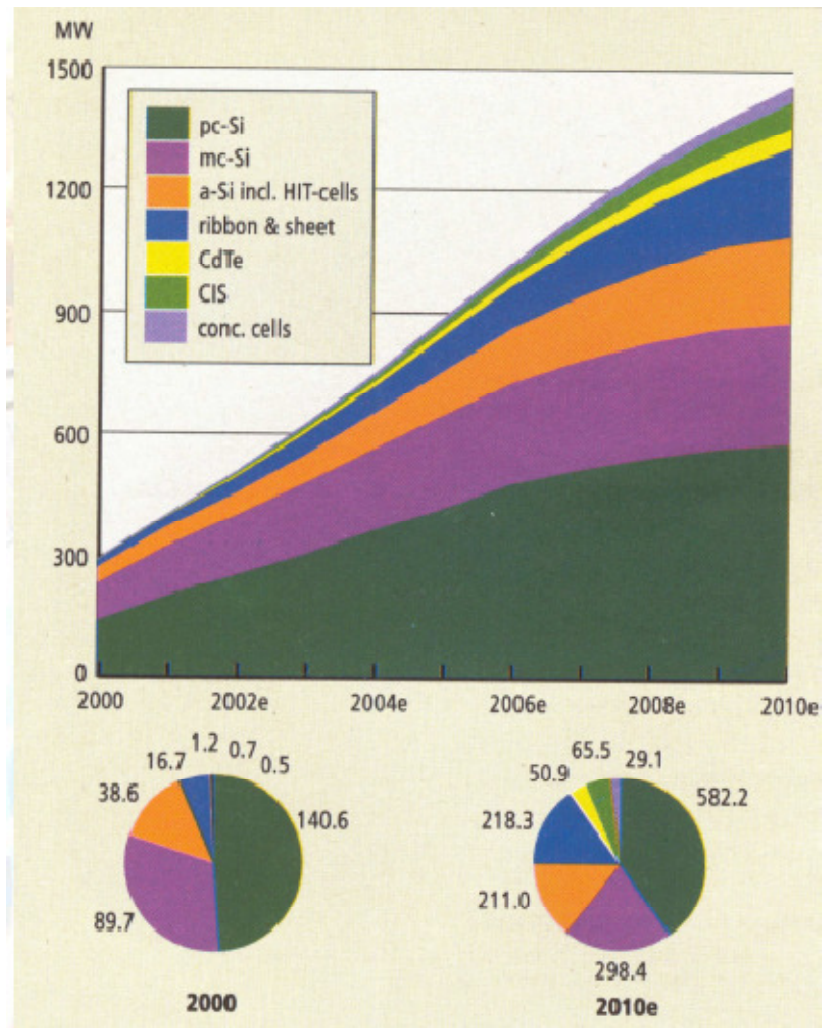


El principal motivo es la independencia de la tecnología policristalina de otras industrias.

Es un producto destinado a fabricar módulos fotovoltaicos. El monocristalino está influenciado por la situación del mercado de los semiconductores.

Las previsiones hasta el 2010 indican que el porcentaje quedara en orden de mayor a menor de la siguiente forma:

- xii. Policristalino 40%.
- xiii. Monocristalino 20.5%.
- xiv. Ribbon y sheet c-Si, 15%.
- xv. Amorfo incl. HIT de sanyo, 14.5%.
- xvi. CIS, 4.5%.
- xvii. CdTe, 3.5%.
- xviii. Otros 2%.



5.6.2 Proceso de fabricación de las células cristalinas

En el proceso de fabricación de las células solares de silicio se puede dividir en tres grandes etapas:

- Obtención del Si de alta pureza.** Este se obtiene a partir del óxido de silicio, SiO_2 , básicamente cuarzo, cuya abundancia en la naturaleza elimina problemas de abastecimiento. Este tiene que ser de alta pureza, semejante al semiconductor que se utiliza en la industria electrónica. Actualmente se está trabajando con silicio de menor pureza, pero útil para la fabricación de células solares y a menos costo.
- Obtención de obleas.** Utilizando como materia prima polvo de silicio de alta pureza se hace crecer el monocristal hasta obtener una pieza cilíndrica de diámetro variable entre 2 y 20 cm y longitud de alrededor de 1 m. el crecimiento del monocristal sirve para purificar el material y para la

creación de una estructura perfecta, gracias a la cual la futura oblea gozará de propiedades semiconductoras

La barra de silicio se corta mediante sierras especiales produciendo obleas de espesor aproximado de 300 μm . En esta etapa hay una pérdida de material aproximadamente del 60% en forma de serrín. Actualmente existen otras formas más eficientes de cortado de la barra.

- c. **Procesamiento de la oblea.** Para obtener finalmente la célula solar, la oblea sufre un procesamiento que consiste en los siguientes pasos:

- xix. Lapeado y pulido
- xx. Formación de unión p-n
- xxi. Decapado y limpieza
- xxii. Capa anti reflectante
- xxiii. Fotolitografía para formación de contactos
- xxiv. Formación de contactos y electrodos
- xxv. Material para soldadura de electrodos
- xxvi. Limpieza del decapante
- xxvii. Comprobación de las características de la celda

La formación de la unión p-n es la etapa crítica de todo el proceso de fabricación, debido a que el buen funcionamiento de la célula solar depende en gran medida de una buena unión p-n. Por otro lado, una adecuada capa anti reflectante también es necesaria, ya que una superficie de Si bien pulida puede llegar a reflejar hasta el 34% de la radiación de onda larga y un 54% si la radiación es de onda corta.

5.6.3 Proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos

El proceso de fabricación de los módulos fotovoltaicos terrestres está muy estandarizado. La mayoría están formados por un sándwich compuesto por vidrio extra claro de bajo contenido en hierro, EVA, células, EVA y Tedlar.

Existen algunas opciones como colocar vidrio en la parte posterior en lugar del Tedlar, pero todas deben cumplir los ensayos de la norma IEC 61215 que se titula “Módulos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino para aplicación terrestre. Cualificación del diseño y aprobación de tipo”.

El proceso de montaje de paneles consta de las siguientes operaciones:

- Soldadura de tiras de cobre en la parte delantera de la célula.
- Soldadura de tiras de cobre en parte trasera de la célula y formación de tiras.
- Colocación de EVA y tedlar, tiras de células, soldadura de buses.
Prelaminado.
- Laminado de panel.
- Recorte de rebabas, enmarcado y colocación de caja de conexiones.

- Control final mediante simulador solar.

El coste aproximado de una línea de producción de paneles de 1MWp es de unos 500.000 EUR.

6 Energía eólica

6.1 Generalidades

Históricamente las primeras aplicaciones de la energía eólica fueron la impulsión de navíos, la molienda de granos y el bombeo de agua, y sólo hasta finales del siglo pasado la generación de energía eléctrica. Actualmente las turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en electricidad por medio de aspas o hélices que hacen girar un eje central conectado, a través de una serie de engranajes (la transmisión) a un generador eléctrico.

La investigación y desarrollo de nuevos diseños y materiales para aplicaciones en aerogeneradores eólicos, hacen de esta tecnología una de las más dinámicas, por lo cual constantemente están saliendo al mercado nuevos productos más eficientes con mayor capacidad y confiabilidad.

6.1.1 El aprovechamiento de la energía eólica y el viento

En la actualidad, el país que lidera en cuanto a la explotación y uso de la energía eólica es EE.UU, debido a importantes inversiones hechas durante la década de los 80 y comienzos de los 90, aunque actualmente sus programas de inversión han disminuido fuertemente. Otros países como Inglaterra, Alemania, Dinamarca, España, India y China, se muestra más activos y cuentan con programas ambiciosos de inversiones para el futuro inmediato.

En lo que se refiere a tecnología, en la actualidad se está promocionando aerogeneradores de hasta 5MW de potencia como tecnología probada, mientras que el trabajo de desarrollo continúa avanzando tratando de introducir cada vez de mayor capacidad.

Alrededor de un 1.5% de la energía proveniente del Sol es convertida en energía eólica.

La cantidad de energía contenida o proporcionada por las masas de aire en movimiento en su circulación por las capas bajas de la atmosfera, representa un nivel de potencial energético relativamente elevado, especialmente en determinadas condiciones locales y temporales, de tal modo que se justifica el esfuerzo por llevar a cabo su transformación en energía útil y su aprovechamiento en condiciones favorables de eficiencia rentabilidad, dado el grado de desarrollo alcanzado por las tecnologías de conversión eólica.

El viento resulta de la expansión y convección del aire provocadas por las diferentes absorciones de la energía solar de la Tierra. A escala global, estos efectos térmicos se combinan con efectos dinámicos debidos a la rotación terrestre dando lugar a la circulación general atmosférica. Además de esta situación a gran escala, se dan importantes variaciones locales y temporales causadas por factores geográficos y climáticos. Las regiones alrededores del ecuador, a 0° de latitud, son calentadas por el

sol más que las zonas del resto del globo. El aire calenté es más ligero que el aire frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10km y se extenderá hacia el norte y hacia el sur. Si el globo no rotase el aire simplemente llegaría al Polo Norte y al Polo Sur, para posteriormente descender y volver al Ecuador.ⁱ

El viento se produce por el movimiento de las masas de aire en la troposfera, la <capa más baja de la atmosfera. Dentro de ella, los vientos que tendrán interés desde el punto de vista energético son los que se producen a nivel de la superficie terrestre.

El viento es considerado como recurso energético y por lo tanto debe ser analizado desde el punto de vista de su disponibilidad como suministro, tiene una serie de características a evaluar: es una fuente con sustanciales variaciones temporales, al pequeña y gran escala de tiempo, y especiales, tanto en superficie como en altura, contando además con una componente aleatoria que afecta en gran parte a su variación total. Hay que considerar que la energía eólica disponible por unidad de área expuesta al viento es proporcional al cabo de la velocidad, por lo que pequeñas variaciones en la velocidad del viento conllevan sensibles variaciones en la energía suministrada.

Estas características del viento influyen de forma importante en varias aéreas de trabajo relacionadas con los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica:

- En la selección del emplazamiento más favorable para la instalación de los sistemas eólicos dadas las acusadas diferencias locales del viento.
- En la estimación o previsión de la producción energética y el funcionamiento global del sistema eólico, donde se consideran valores medios de viento y distribuciones diarias estacionales, direccionales, etc., en lugares específicos o de interés.
- En el diseño del sistema, donde se tiene en cuenta las condiciones medias representativas y condiciones extremas de viento.
- En la operación y regulación del sistema eólico, donde intervienen aspectos como la predicción del viento para planificar el funcionamiento en tiempo real, así como características del viento que influyen en la estrategia de operación (arranque, parada, orientación, etc.) y factores que afectan al mantenimiento o vida útil del sistema (ráfagas, turbulencias, etc.).

6.1.2 Obtención y tratamientos de datos de viento

6.1.2.1 Parámetros representativos del potencial eólico

A la hora de evaluar un emplazamiento hay que determinar las características del viento en el mismo, para lo cual habrá que considerar cada uno de los siguientes aspectos:

- Condiciones generales del viento en un emplazamiento (medias diarias, estacionales, anuales)
 - Datos de 10 minutos a 1 hora de promedio:
 - Condiciones meteorológicas (temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, densidad del aire)
 - Distribución de frecuencia de dirección
 - Variación temporal de la velocidad
 - Potencial eólico disponible
- Características del viento para el funcionamiento del sistema:
 - Datos de 10 minutos a 1 hora de promedio
 - Perfil vertical de velocidad horizontal
 - Variaciones temporales.
 - Relaciones con la dirección
 - Variación de la velocidad vertical
 - Relaciones entre el viento vertical y la dirección.
 - Relaciones entre el viento vertical y el horizontal.
 - Datos de 1 minuto a 10 minutos de promedio.
 - Factores de fatiga.
 - Relaciones entre la velocidad, dirección y factor de fatiga.
 - Características de la turbulencia
 - Relaciones entre dirección y turbulencia.
 - Relaciones entre velocidad y turbulencia.
 - Desviación de la velocidad.

6.1.2.2 Toma de medidas

Instrumentación

La instrumentación de medida necesaria en energía eólica es:

- Anemómetros para medir la velocidad del viento.
- Veletas para medir la dirección.
- Termómetro para medir la temperatura ambiente del aire.
- Barómetros para medir la presión atmosférica ambiental.

En general, la señal que proviene de los instrumentos de medida está conectada a un sistema de registro de diversos tipos:

- Un dispositivo de integración.
- Un indicador.

- Un dispositivo de grabación, por ejemplo, el soporte magnético o electrónico.

Anemómetros

Son los instrumentos utilizados para determinar la velocidad del viento. Pueden clasificarse según su principio de operación:

- De rotación.
- De presión.
- Anemómetros de hilo caliente.
- Anemómetros basados en el efecto sónico.
- Otras técnicas incorporan el anemómetro laser, ultrasónico y el anemómetro SODAR, de efecto Doppler.

La calidad de las mediciones de viento es un punto esencial en el análisis de viabilidad y técnico de un proyecto de energía eólica. Es un punto que afectara a la selección adecuada del emplazamiento, el estudio de la rentabilidad económica de la instalación, la adecuada elección de equipos y diseño de la planta, etc.

Hay que tener en cuenta que si bien es cierto que se pueden adquirir anemómetros muy baratos, no serán validos para realizar mediciones de viento, aunque cuando realmente no se necesite una gran precisión pueden ser adecuados.

La mejor forma de medir la velocidad del viento en una futura localización de una turbina eólica es situar un anemómetro en el extremo superior de un mástil que tenga la misma altura que la altura de buje esperada de la turbina que se va a utilizar. Esto evita la incertidumbre que conlleva recalcular la velocidad del viento a una altura diferente.

Si hay muchas lluvias heladas en la zona o escarcha en las montañas, puede necesitar un anemómetro calentado, que requiere una conexión a la red eléctrica para hacer funcionar el calentador.

Medida de la temperatura

La medida de la temperatura se utiliza para la determinación de la potencia suministrada, así como para evaluar la climatología local en emplazamientos de parques eólicos. Los termómetros corrientes basados en un elemento de resistencia de platino son los más utilizados.

Medida de la presión atmosférica

La presión atmosférica se utiliza para la determinación de la potencia suministrada en una instalación eólica. Generalmente se utiliza un barómetro meteorológico.

Frecuencia y duración de las medidas

La frecuencia de las medidas depende fundamentalmente del uso destinado para los datos.

La duración de las medidas también depende del propósito de las mismas. Si queremos instalar aerogeneradores en un determinado emplazamiento, las directrices a seguir serán:

- Medir durante un periodo de tiempo lo más largo, práctico y económicamente posible.
- Intentar medir en cada estación del año, dado que los patrones de la velocidad y dirección del viento son relativamente estacionales.
- Comparar con las medidas de otros lugares vecinos donde están disponibles datos correspondientes a los largos periodos de tiempo.
- Comparar las medidas con las tendencias regionales a largo plazo, ya que existen evidencias de que ocurren significantes variaciones climatológicas en la velocidad del viento.

Según sea la velocidad se pueden considerar tres tipos de definiciones para la medida del viento:

- a. Viento instantáneo; se mide la velocidad del viento en un instante determinado.
- b. Viento medio aeronáutico; se mide la velocidad media durante 2 minutos.
- c. Viento medio meteorológico; se mide la velocidad media durante 10 minutos.

Ubicación de los sensores

Los sensores han de estar ubicados en lugares bien expuestos a todas las direcciones y sin obstáculos en los alrededores.

Elección de los instrumentos de medida

Los factores fundamentales a tener en cuenta en la elección de un instrumento son los siguientes:

- Coste y viabilidad.

- Sensibilidad.
- Calibración adecuada, con el fin de garantizar la fiabilidad de los datos.
- Robustez, soportar posibles daños.
- Compatibilidad de las especificaciones de sensibilidad y fiabilidad del sistema completo.
- Accesibilidad del emplazamiento y disponibilidad y calidad de datos.

6.1.2.3 Tratamiento de los datos eólicos

La distribución de direcciones de viento es de vital importancia a la hora de ubicar las turbinas eólicas en terrenos no uniformes o formando varios conjuntos de ellas, e incluso para conocer la variabilidad direccional del régimen de vientos al que debe responder el sistema de orientación de la máquina.

La representación más habitual es la de la rosa de los vientos, en la que se expresa el porcentaje de tiempo en el que el viento tiene una determinada dirección. Normalmente, también se refleja la distribución de velocidades de viento para cada intervalo direccional.

Una rosa de los vientos se divide normalmente en doce o dieciséis sectores, abarcando cada uno 22,5° o 30° del horizonte.

En la rosa de los vientos se representa la velocidad del viento y la frecuencia relativa de cada una de las dieciséis direcciones del viento, es decir, que tanto por ciento del tiempo el viento sopla desde esa dirección.

Mirar la rosa de los vientos es extremadamente útil para situar los aerogeneradores. Lo que se buscara cuando se coloque una turbina eólica en el paisaje, será tener la menor cantidad de obstáculos posibles en esa dirección, así como un terreno lo más liso posible.

6.1.3 Selección de emplazamientos

El objetivo más importante en la selección de emplazamientos para instalaciones eólicas es maximizar la captación de energía para reducir el coste de producción. La situación más usual es aquella en la que hay que determinar la producción energética en un emplazamiento donde no han sido realizadas medidas de vientos. En general, los pasos a seguir serán:

- Estimación de los recursos eólicos en un lugar donde no existen registros de viento disponibles.

- Estimación de la energía eólica a la altura del buje de las aeroturbinas, normalmente diferente de la altura a la cual están recogidos los datos.
- Estimación de los recursos eólicos referidos a largo plazo en un lugar donde se dispone de datos referidos a un periodo corto de medidas.

El mero hecho de observar la naturaleza resulta de excelente ayuda a la hora de encontrar un emplazamiento apropiado para el aerogenerador. Los árboles y los matorrales de la zona serán una buena pista para saber cuál es la dirección de viento dominante. Si nos movemos a lo largo de un litoral accidentado, observaremos la forma en que el proceso de erosión ha trabajado el perfil del terreno en una dirección en particular.

Debe tenerse en cuenta que los aerogeneradores tienen que ser conectados a la red eléctrica, para los proyectos de pequeñas dimensiones es fundamental que haya una línea de alta tensión de 10-30kV relativamente cerca, para que los costes de cableados no sean prohibitivamente altos. Para los proyectos de grandes dimensiones es necesario integrar la salida del parque eólico con la red eléctrica de muy alta tensión, evacuando la energía producida a los sistemas de 160 o 400 kV.

6.1.3.1 Factores influyentes en el funcionamiento de un sistema eólico

Los factores meteorológicos más importantes que afectan al diseño, funcionamiento, emplazamiento y operaciones un parque eólico son los siguientes:

- Velocidad media del viento, y sus variaciones, tanto diurnas, estacionales e interanuales.
- Distribución de probabilidades de velocidades.
- Variación con la altura de la velocidad y de la dirección.
- Distribución de direcciones y probabilidades de cambios bruscos de dirección.
- Variaciones estacionales y diurnas de la densidad del aire y variaciones de la altura.
- Características de las series temporales de altos vientos y de periodos de calma.
- Interacciones entre estelas de máquinas en los parques eólicos.
- Frecuencias de condiciones extremas de viento.
- Condiciones atmosféricas especiales.

6.1.3.2 Criterios básicos de selección de emplazamientos

Los emplazamientos óptimos han de cumplir una serie de características:

- Elevada velocidad media.
- Variaciones diurnas y estacionales aceptables.
- Aceptables niveles de vientos extremos y turbulencia

Los emplazamientos que suelen cumplir estas características se pueden incluir dentro de la lista siguiente:

- Pasos entre montañas en áreas de altos gradientes de presión.
- Largos valles descendiendo de cadenas montañosas.
- Llanos y llanuras elevadas.
- Llanuras y valles con vientos altos asociados a fuertes vientos de gradientes de presión.
- Elevaciones con buena exposición, cimas de montañas de áreas de fuertes vientos de altura.
- Lugares costeros bien expuestos en áreas de fuertes vientos de altura o fuertes gradientes de presión.
- Lugares con vegetación acusadamente deformada por la acción de los vientos dominantes.

6.1.3.3 Aspectos particulares en la selección

En función del tipo de aplicación y tamaño de la instalación deberán tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- En el emplazamiento de instalaciones eólicas de pequeña potencia para uso local, la selección de emplazamiento está restringida a un área pequeña. Solo puede seleccionarse el emplazamiento más favorable, y estimar con relativa fiabilidad las características eólicas del emplazamiento, teniendo en cuenta los efectos de la topografía local y de las características de la rugosidad del terreno.
- En el emplazamiento de grandes máquinas para producción eléctrica, los métodos empleados son bastante sofisticados. además de un emplazamiento con buenas condiciones eólicas, hay que estudiar la viabilidad económica, la compatibilidad del diseño con las particularidades meteorológicas, así como los efectos medioambientales y de seguridad.
- En los grandes parques eólicos, la influencia de las estelas de las máquinas puede disminuir la potencia total comparada con la potencia equivalente de las máquinas individualmente. En general, la mejor disposición consistiría en ubicar el menor número

posible en la dirección paralela a los vientos predominantes y el mayor número posible en la dirección perpendicular. Para minimizar los efectos de las estelas en un parque, la separación lateral mínima recomendada entre máquinas debe estar entre 3 y 5 diámetros, y la separación en la dirección predominante del viento entre 7 y 10 diámetros.

Es necesario hacer un balance global de varios factores entre los que se incluyen la disponibilidad del terreno, los costes de infraestructuras interconexión y la pérdida de energía que implicarían las diversas posibilidades.

6.1.3.4 Distribución del parque

Efecto de la estela

Dado que un generador produce energía a partir de la energía del viento, el aire que abandona la turbina debe tener un contenido energético menor que el que llega a la turbina. Este se deduce directamente del hecho de que la energía ni se crea ni se destruye. Un aerogenerador siempre va a crear un abrigo en la dirección a favor del viento.

Habrà una estela tras la turbina, es decir, una larga cola de viento bastante turbulenta y ralentizada, si se compara con el viento que llega a la máquina.

Realmente puede verse la estela tras un aerogenerador si se le añade humo al aire que va a pasar a través de la turbina.

En los parques eólicos, para evitar una turbulencia excesiva corriente abajo alrededor de las turbinas, cada una de ellas suele estar separada del resto por una distancia mínima equivalente a tres diámetros del rotor. En las direcciones de viento dominante esta separación es incluso mayor.

Distribución en planta del parque

Debido al efecto estela, cada aerogenerador ralentiza el viento tras de sí al obtener energía de él para convertirla en electricidad. Por lo tanto, lo ideal sería separar las turbinas lo máximo en la dirección de vientos dominantes. Pero el coste del terreno y de la conexión de los aerogeneradores a la red eléctrica emplazar las turbinas más cerca unas de otras.

La separación entre aerogeneradores en un parque eólico es de cinco a nueve diámetros de rotor en la dirección de los vientos dominantes, y de tres a cinco diámetros de rotor en la dirección perpendicular a los vientos dominantes.

Efecto túnel

Si la velocidad normal de viento en un terreno abierto puede alcanzar seis metros por segundo, en un pasillo natural puede fácilmente llegar a los nueve metros por segundo.

Situar un aerogenerador en un túnel de este tipo es una forma de obtener velocidades del viento superiores a las de las áreas colindantes. Para obtener un buen efecto túnel este debe estar suavemente enclavado en el paisaje. En el caso de que las colinas sean muy accidentadas, puede haber muchas turbulencias en el área, el viento soplará en muchas direcciones diferentes.

Si hay muchas turbulencias, la ventaja que supone la mayor velocidad del viento se verá completamente anulada, y los cambios pueden causar rupturas y desgastes innecesarios en el aerogenerador.

El efecto de la colina

Una forma corriente de emplazar aerogeneradores es situarlos en colinas o estribaciones dominando el paisaje circundante. Siempre supone una ventaja tener una vista de lo más amplia posible en la dirección del viento dominantes en el área.

En las colinas, siempre se aprecian velocidades de viento superiores a las de las áreas circundantes.

El viento empieza a inclinarse algún tiempo antes de alcanzar la colina, debido a que en realidad la zona de altas presiones se extiende hasta una distancia considerable entrante de la colina. También se hace muy irregular una vez pasa a través del rotor del aerogenerador.

Si la colina es escarpada o tiene una superficie accidentada, puede haber una cantidad de turbulencias significativas, que puede anular la ventaja que supone tener velocidades de viento mayores.

6.1.3.5 Otros factores

A parte de las características del viento, existen otros factores de cierta relevancia sobre la selección de un emplazamiento para un parque eólico:

- Económicos.
- Ambientales.
- Institucionales.
- Meteorológicos.
- Técnicos.
- Aceptación.

6.1.3.6 Ventajas e inconvenientes de los parques eólicos

Los parques eólicos, o los aerogeneradores aislados, tiene sus ventajas e inconvenientes.

Entre las ventajas podemos destacar:

- Coste energético estable. Una vez realizada la inversión, los aerogeneradores pueden trabajar muchos años con un rendimiento apropiado si se hace correctamente el mantenimiento.
- Energía limpia inagotable.
- Instalaciones ampliables. Se puede aumentar continuamente el numero de generadores, s lo permite las condiciones del terreno y las necesidades de electricidad.
- Desarrollo rural. Los parques eólicos pueden ayudar a pueblos en las zonas montañosas sin apenar aprovechamientos, y donde si es posible montar estos parques.
- Contribución a la disminución del consumo de combustibles fósiles. Se reduce las emisiones de CO₂ a la atmosfera, y se frena el calentamiento.
- Instalaciones pequeñas. Se pueden poner pequeños aerogeneradores para abastecer de electricidad a viviendas o comunidades aisladas.

Los inconvenientes son:

- Daños a las aves que colisionan con los aerogeneradores-
- Contaminación visual.
- Movimiento de tierras. Para hacer las fundaciones de las torres los accesos al parque eólico, hay que mover tierras que pueden tener un valor ecológico.
- Nivel sonoro.
- Inversión inicial fuerte.

6.2 Aerogeneradores

6.2.1 Funcionamiento de un aerogenerador

Los aerogeneradores son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, aprovechan la energía del viento para producir electricidad, la captación de la energía eólica se produce mediante la acción del viento sobre las aspas. El aire es obligado a fluir por las caras superior e inferior de un perfil inclinado, generando una diferencia de presiones entre ambas caras, y dando lugar a una fuerza resultante que actúa sobre el perfil.

Si descomponemos esta fuerza en dos direcciones obtendremos:

- Fuerza de sustentación, o simplemente sustentación de dirección perpendicular al viento.
- Fuerza de arrastre, de dirección paralela al viento.

Para que un aerogenerador se ponga en marcha necesita de un valor mínimo de viento para vencer los rozamientos y comenzar a producir trabajo útil, a este valor mínimo se le denomina velocidad de conexión, sin la cual no es posible arrancar un aerogenerador. A partir de este punto empezará a rotar convirtiendo la energía cinética en mecánica, siendo de esta forma hasta que alcance la potencia nominal, generalmente la máxima que puede entregar.

6.2.2 Componentes de un aerogenerador

Un aerogenerador consta de cuatro componentes principales:

- Cimentación.
- Torre
- Góndola.
- Rotor.

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina eólica accionada por el viento.

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etc.

En cada aerogenerador se pueden distinguir principalmente dos tipos de mecanismos o elementos: los mecánicos y los eléctricos. La energía mecánica de viento se transmite gracias a la turbina eólica y a su eje hasta la caja de cambios. La caja de cambios transmite esta energía, adecuando la velocidad rotacional, al eje del generador eléctrico. Este transforma la energía mecánica en energía eléctrica. El convertidor permite controlar el generador eléctrico y se usa o no en función del tipo de máquina del que se disponga. El transformador eleva la tensión para inyectar la energía en la red eléctrica.

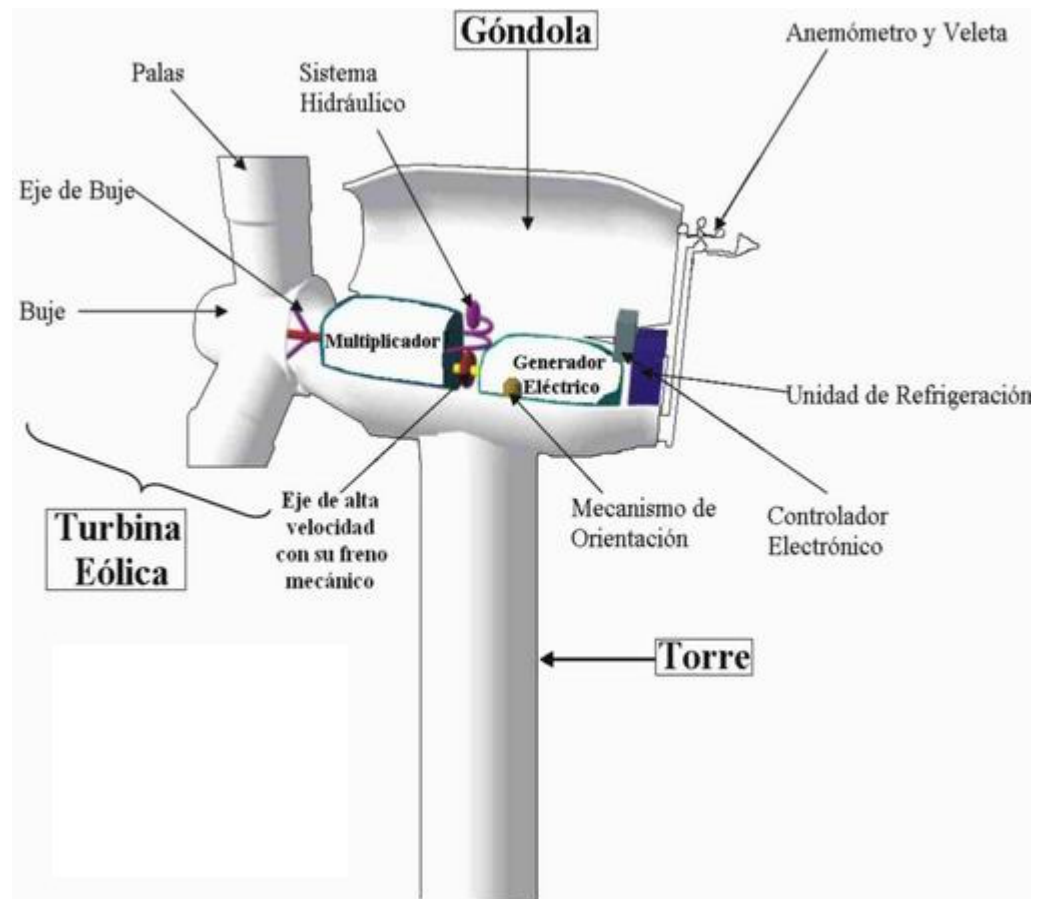


Figura 24: Componentes de un aerogenerador

En la Figura 24 se muestra un esquema de los componentes de una turbina eólica.

6.2.3 Cimentación

El diseño de la cimentación de un aerogenerador es principalmente función de sus dimensiones y de las características geotécnicas del terreno.

El concepto de cimentación que más se utiliza es una zapata aislada de unos 10-15 metros de alto y 1-2 metros de canto, la comprobación crítica es la de vuelco.

Además hay que comprobar que no se superan las tensiones máximas admisibles en el terreno.

6.2.4 La torre

La torre es donde se sustenta todo el conjunto del aerogenerador, la mayoría de los grandes aerogeneradores disponen de torres tubulares de acero, fabricadas en

secciones de 20-30 metros con bridas atornilladas en cada uno de los extremos, que son unidas con pernos. Las torres son tronco-cónicas, con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.

Las torres pueden ser tubulares o de celosía (similares a las de las torres de alta tensión).

Una torre tipo puede llegar a medir de 40 a 80 metros.

La principal ventaja de las torres de celosía es que son más baratas. Dependiendo del tipo de aerogenerador y de su tamaño, podemos encontrar además de torres tubulares o fabricadas con celosía, torres de mástil tensado con vientos, una combinación de las dos anteriores.

El precio de la torre de la turbina eólica supone alrededor de un 20% del coste total de la turbina. Es importante realizar un diseño optimizado de la torre, pues contribuye en gran medida al precio total del aerogenerador. Las comprobaciones a realizar son: verificación de la respuesta dinámica, asegurando que las frecuencias naturales no coinciden con las de excitación del rotor; comprobación de uniones soldadas y atornilladas; verificación de la estabilidad de la torre y comprobación a fatiga y pandeo local en zonas de puertas y ventanas.

Su tamaño depende directamente del tamaño de las palas y la potencia del aerogenerador.

Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del nivel del suelo.

6.2.5 La góndola

Contiene los componentes claves del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. En el interior de la góndola se encuentran los siguientes elementos:

- Rotor o buje: es el elemento al que se conectan las aspas. Va unido al eje principal. Es la pieza que gira gracias a la acción del viento, no se encuentra dentro de la góndola, si no unida a esta por su parte posterior.
- Multiplicadora: aumenta las revoluciones del rotor para que el generador pueda funcionar.
- Generador: es un alternador. Es el encargado de producir corriente eléctrica.
- Anemómetro: mide la velocidad del viento en todo momento.
- Motor de orientación: se encarga de hacer girar la corona de orientación según la dirección del viento.
- Velea: detecta la dirección en la que sopla el viento.

- Eje principal o eje de alta velocidad: une la multiplicadora con el rotor.
- Eje pequeño o de baja velocidad: transmite la potencia de giro desde la multiplicadora hasta el generador eléctrico.
- Electrofreno: reduce las revoluciones del rotor cuando es necesario.
- Sistema de refrigeración: es el encargado de refrigerar el generador eléctrico.
- Controlador: es un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación.
- Corona de orientación: gran rueda dentada que engrana con la del motor de orientación.

El bastidor delantero soporta toda la maquinaria del aerogenerador, debiendo transmitir esos esfuerzos hacia la torre a través del sistema de orientación. Normalmente se fabrican mecosoldados con acero o de fundición de hierro esferoidal. Al igual que en el caso del buje, la comprobación a fatiga resulta crítica. En los bastidores mecosoldados deben comprobarse, todas las uniones soldadas, especialmente a fatiga. Además, la rigidez del bastidor debe ser suficiente para evitar movimientos relativos entre multiplicadora y rodamientos.

El bastidor trasero es una pieza mucho menos crítica, normalmente mecosoldada en acero S-275 o S-355, en la que no es necesario realizar la comprobación a fatiga. Si debe asegurarse cierta rigidez para evitar que amplifique vibraciones de maquinaria y facilitar el transporte.

6.2.6 El rotor

El rotor es el elemento principal de una máquina eólica, su función es la transformación de la energía cinética del viento en mecánica utilizable. Se denomina al conjunto como rotor, teniendo en cuenta que el sistema está formado por el buje, el eje y el sistema de regulación de potencia.

El buje es el componente del rotor que une las palas con el sistema de rotación y constituye el centro del rotor, al cual se fijan las palas.

Existen gran variedad de rotores y su clasificación más usual se realiza en función de la disposición del eje: horizontal o vertical. Los rotores de eje horizontal tienen aspas que giran en un plano vertical. Para sistemas de generación eléctrica, el rotor consiste generalmente en dos o tres aspas y está hecho de fibra de vidrio con poliéster o epoxy; además el cubo que conecta las aspas al eje.

6.2.6.1 Las palas del aerogenerador

Las palas del rotor capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. En un aerogenerador moderno con más de 2MW, cada pala mide alrededor de 40 metro de longitud.

Los perfiles son gruesos de la parte más interior de la pala suelen estar específicamente diseñados para turbinas eólicas. La elección de los perfiles de las palas del rotor conlleva una solución de compromiso entre unas características adecuadas de sustentación y perdido de sustentación, y la habilidad del perfil para funcionar bien incluso si hay algo de suciedad en su superficie.

Las palas, compuestas de una estructura resistente y dos conchas que forma el perfil aerodinámico, de forma alabeada y anchura decreciente hacia la punta en dirección axial, se fabrican habitualmente en materiales compuestos de matriz de poliéster y refuerzo de fibras de vidrio y/o carbono. Además de comprobar la integridad estructural frente a cargas últimas y de fatiga, en las palas de grandes dimensiones resulta crítico el pandeo frente a cargas ultimas.

Las palas del rotor de los grandes aerogeneradores tiene una ligera curvatura y no son completamente rectas, precisamente para favorecer la entrada del viento.

Visto desde la pala al rotor, llegará desde un ángulo mucho mayor conforme nos desplazamos hacia la base de la pala en el centro del rotor. La pala dejara de proporcionar sustentación si el viento llega con un ángulo de ataque demasiado grande, por lo que debe estar alabeada, con el fin de conseguir un ángulo de ataque óptimo a lo largo de toda la longitud de la misma.

6.2.6.2 El buje

En el sector de los aerogeneradores el buje es el elemento que se encuentra en la parte frontal del aerogenerador. Este es el elemento al que van unidas las palas y el único elemento externo que gira.

Consiste en una esfera hueca cortada por tres planos en los que se conforman las bridas de unión a los rodamientos de pala, se fabrica normalmente en fundición de hierro esferoidal, siendo la verificación a fatiga la más crítica n su diseño.

A este elemento se le une mediante pernos y traccionados los llamados rodamientos de pala, los cuales minimizan el rozamiento de las palas al girar sobre su propio eje. La mayoría de los fabricantes de aerogeneradores utilizan acero en diversas aleaciones en función de distintas variables (temperatura, tipo de viento, grado de humedad, etc.) proveniente de fundición para realizar este elemento. En las actuales maquinas capaces de generar entre 2 y 24 MW suelen pesar con todos los elementos alrededor de 20 a 35 Tm.

El buje del rotor esta acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador. Las tensiones en el buje son muy dependientes de la rigidez asociada al interfaz con la pala, por lo que es muy importante establecer bien las condiciones de contorno en este interfaz a la hora de realizar la comprobación estructural.

6.2.7 Materiales en energía eólica

6.2.7.1 Requerimientos en la selección de materiales^{vi}

Los distintos componentes de una aeroturbina se diseñan bajo formas constructivas y con materiales que deben atender principalmente a los siguientes requisitos:

- Resistencia estructural: capaces de soportar, sin que se produzca daño, las cargas máximas previsibles de ocurrir durante el periodo de vida de la maquina.
- Resistencia a fatiga: capaces de soportar las cargas de fatiga que aparezcan durante la vida de la maquina.
- Rigidez: desplazamientos inferiores a los máximos permitidos.
Rigidez mayor que la mínima necesaria para evitar inestabilidades.
Frecuencias propias de vibración suficientemente alejadas de las fuerzas excitadores para que las cargas dinámicas no resulten amplificadas.
- Peso: el peso debe ser el mínimo necesario para tener el mínimo coste y minimizar las cargas de tipo inercial y gravitatorio sobre los diversos componentes de la maquina.
- Fabricación: facilidad de fabricación que requiera técnicas de fabricación y materiales adaptados a la maquinaria y tecnología existente en la industria.
- Resistencia a los agentes medioambientales: resistencia a la corrosión en ambientes marinos. Resistencia a la degradación por la radiación solar.

6.2.7.2 Selección de materiales y tipos estructurales componentes

Los materiales que forman las diferentes partes de un sistema eólico están sometidos a cargas variables, que pueden ser aleatorias, como las debidas a la variación del viento, o de carácter cíclico y determinístico, por lo que es necesario realizar el dimensionamiento en fatiga de los elementos. Cada uno de ellos se verá sujeto a un número muy elevado de ciclos de carga-descarga, habiendo sido hasta hace poco tiempo un serio problema la falta de datos de fatiga para más de un millón de ciclos. Por otra parte, la variabilidad en las cargas y las condiciones de brusca aplicación de las mismas hacen que deba tenerse muy en cuenta la tenacidad del material.

6.2.7.2.1 Torre soporte

Se utilizan dos tipos estructurales de torres principalmente:

Torre de celosía

Estructura de barras articuladas que trabajan a tracción o compresión.



Torre tubular

Estructura en forma de tubo cilíndrico o tronco-cónico de pared delgada que trabaja como una viga esbelta empotrada sometida a esfuerzos normales y cortantes y momentos flectores y torsores.



Para la fabricación de la torre los materiales a utilizar son:

Acero:

- acero estructural soldable con $R > 360 \text{ N/mm}^2$
- aceros St-37 - St-52 (DIN 17100)

Hormigón reforzado:

Hormigón con resistencia característica a los 28 días $> 15 \text{ N/mm}^2$ acero de refuerzo (DIN 488)

A continuación se hará una pequeña explicación del acero, sus propiedades, ventajas e inconvenientes de su uso:

Es una aleación en caliente de carbono con el metal hierro y puede tener más aleaciones como el azufre, fósforo, manganeso, etc. en la producción del acero se tiene el producto final cuando se le elimina todo el óxido que trae de su estado natural siendo el material más importante para la construcción.

Las características positivas más características del acero son las que se exponen a continuación:^{vii}

Alta resistencia mecánica: Los aceros son materiales con alta resistencia mecánica al someterlos a esfuerzos de tracción y compresión y lo soportan por la contribución química que tienen los aceros. Por medio de los ensayos de laboratorio se

determina la resistencia a tracción y a compresión evaluando su límite elástico y el esfuerzo de rotura.

Elasticidad: La elasticidad de los aceros es muy alta, en un ensayo de tracción del acero al estirarse antes de llegar a su límite elástico vuelve a su condición original.

Soldabilidad: Es un material que se puede unir por medio de soldadura y gracias a esto se pueden componer una serie de estructuras con piezas rectas.

Ductilidad: Los aceros tienen una alta capacidad para trabajarlos, doblarlos y torcerlos.

Forjabilidad: Significa que al calentarse y al darle martillazos se les puede dar cualquier forma deseada.

Trabajabilidad: Se pueden cortar y perforar a pesar de que es muy resistente y aun así siguen manteniendo su eficacia.

De los aceros también se puede distinguir una serie de características negativas:

Oxidación: Los aceros no inoxidable tienen una alta capacidad de oxidarse si se exponen al aire y al agua simultáneamente y se puede producir corrosión del material si se trata de agua salina.

Transmisor de calor y electricidad: El acero es un alto transmisor de corriente y a su vez se debilita mucho a altas temperaturas, por lo que es preferible utilizar aceros al níquel o al aluminio o tratar de protegerlos haciendo ventilados y evitar hacer fábricas de combustible o plásticos con este tipo de material. Estas dos desventajas son manejables teniendo en cuenta la utilización de los materiales y el mantenimiento que se les dé a los mismos.

El control de calidad de los aceros en nuestro país se basa en dos ensayos:

Comprobación química: Esta se hace porque existen muchos tipos de acero y se exige a la empresa que los fabrica un comprobante de su composición química.

Ensayo de tracción axial: Este ensayo siempre se hace en obra de forma aleatoria a los aceros que se reciben. El objetivo de este ensayo es obtener en cualquier acero su límite de elasticidad y su esfuerzo de rotura para así se conoce la calidad del material y compararlo con los parámetros que se establecen para los aceros de buena calidad, también se obtiene el porcentaje de alargamiento el cual permite conocer la ductilidad del acero.

6.2.7.2.1.1 Fabricación de torres de aerogeneradores

La mayoría de las torres en los aerogeneradores modernos son torres tubulares tronco-cónicas de acero.

En Figura 25 se puede ver un taller de fabricación de torres, muestra como una plancha de acero es enrollada en una subsección cónica para la torre de un aerogenerador. Es un poco complicado conseguir la forma cónica, pues la tensión (presión) de los cilindros de acero tiene que ser diferente en ambos extremos, con el fin de que la plancha se curve adecuadamente.



Figura 25: Taller fabricación torres

Las torres son ensambladas a partir de estas subsecciones cónicas más pequeñas, que son cortadas y laminadas con la forma correcta, y posteriormente unidas por soldadura.

Las torres suelen fabricarse en secciones de 20 a 30 m, siendo el transporte por tren o por carretera el factor limitante. Los pesos típicos de las torres modernas son 40Tm para una torre de 50m de una turbina con un diámetro de rotor de 44m (600 kW), y de 80TM para una torre de 60m para un diámetro de rotor de 72m (2000 kW).

Las torres de aerogeneradores son generalmente diseñadas por cada fabricante de turbinas, ya que todo el aerogenerador en conjunto tiene que ser homologado como una unidad.

Los pesos de las torres (por kW de potencia instalada) han disminuido alrededor del 50 % en los últimos cinco años gracias a métodos de diseño más avanzados. Aunque la torre todavía sigue siendo una parte del aerogenerador bastante

pesada, por lo que los costes de transporte son importantes. En los mercados más grandes, generalmente es mejor no transportar las torres por carretera más de 1000 km. En el caso de que la distancia sea superior (y de que se trate de un gran proyecto) las torres suelen fabricarse localmente.

Para conseguir una sección con forma de cono, la lámina que se utiliza para enrollar debe tener los lados más largos curvados, y los lados cortos no tienen que ser paralelos. La mayoría de fabricantes de torres utilizan máquinas-herramienta de corte por láser para obtener la forma deseada en la lámina de acero.

6.2.7.2.2 Tren de potencia

En el tren de potencia se pueden distinguir distintos elementos, cada uno de ellos fabricados en un material:

Ejes:

Acero forjado o conformado en caliente según (DIN 17200)

Piñones rodamientos y engranajes:

Aceros endurecidos superficialmente (DIN 17210)

Carcasa de multiplicador:

Fundición con grafito esferoidal GGG (DIN 1693)

Fundición con grafito lamelar GG (mm. GG20)(DIN 1691)

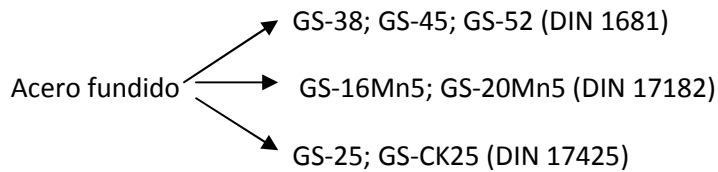
6.2.7.2.3 Base de la góndola

Acero estructural soldable $R > 360 \text{ N/mm}^2$

Aceros St-37 - ST-52 (DIN 17100)

6.2.7.2.4 Buje

El principal material en que se construye el buje, es el acero que se pueden clasificar según la norma que siguen:



6.2.7.2.5 Nariz y capota

Se utiliza normalmente material compuesto de fibra de vidrio cortada, distribuida aleatoriamente y con un porcentaje bajo de fibra, fabricados normalmente por proyección.

6.2.7.2.6 Palas

Es el elemento estructural más importante de la aeroturbina y el que requiere un diseño estructural más cuidadoso.

Los materiales que se emplean pueden ser:

Madera:

La madera, un material natural de estructura fibrosa, proporciona una buena relación resistencia/peso por su baja densidad y tiene también una excelente tenacidad. Como sus propiedades dependen del contenido en agua, suele tratarse con productos anti humedad y es frecuente también el recubrir el borde de ataque de las palas con una lámina metálica para aumentar su duración. Las palas de pequeños aerogeneradores pueden hacerse de maderas naturales, aunque para tamaños medianos se emplean preferentemente laminados con capas cuyas fibras se disponen formando 90° entre sí. Las maderas son fácilmente conformables y a menudo permiten obtener los rotores más económicos.

Acero:

Los aceros presentan como ventajas más señaladas su isotropía y el tener un límite de fatiga definido (excepto en atmósfera corrosiva). Un inconveniente es su poca resistencia a la oxidación, que obliga a proteger las piezas con pinturas o recubrimientos electrolíticos. Por otra parte, tienen algunas propiedades que facilitan su conformación.

Aluminio:

Las aleaciones ligeras, preferentemente de aluminio, ofrecen buenas relaciones resistencia/peso y tenacidad/peso. Son fáciles de conformar por extrusión, procedimiento por el que se obtienen los perfiles aerodinámicos comerciales.

Al igual que se hizo con el acero anteriormente, ahora se realizará una pequeña explicación del aluminio y sus propiedades:

Propiedades físicas

Las propiedades físicas más destacables del aluminio y sus aleaciones son: poco peso, buena resistencia a la corrosión, y conductividad elevada, tanto térmica como eléctrica. En la Tabla 3 se presenta un resumen de las propiedades físicas más características del aluminio puro. Evidentemente, algunas de estas propiedades varían según el contenido en impurezas.

Tabla 3: Resumen de las características físicas del aluminio

Propiedades	Valor
Color	Blanco-plata
Estructura cristalográfica	Cúbica centrada en las caras
Parámetro reticular a (25°)	0.40414 nm
Densidad a 20°C	2.699g/cc
Cambio volumétrico durante la solidificación	6.7%
Calor de combustión	200Kcal/at-gr
Punto de fusión	660.2°C
Punto de ebullición	2057°C/2480°C
Calor específico (20°C)	930J
Coeficiente lineal de expansión térmico x 10 ⁶	23.0 (20-100°C)
Conductividad térmica a 0°C	0.50 cal/s/cm ² /cm/°C
Conductividad térmica a 100°C	0.51 cal/s/cm ² /cm/°C
Resistividad eléctrica a 20°C	2.69 μΩcm
Susceptibilidad magnética 18°Cx10 ⁶	0.63

Propiedades químicas

Tanto el aluminio puro como las aleaciones de éste presentan una gran resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa fina (~ 4 y 5 μm de espesor) y adherente de óxido de aluminio sobre la superficie del metal. Esta capa de óxido constituye una película impermeable que impide la difusión del oxígeno hacia el metal base, haciendo al aluminio y sus aleaciones muy resistentes a la corrosión. Si en determinadas aplicaciones industriales se necesita una mayor resistencia a la corrosión, ésta se puede conseguir aumentando el espesor artificialmente de la capa por un procedimiento de oxidación profunda y, con posterioridad, colmatado por inmersión en agua caliente.

El ácido clorhídrico, fluorídrico y sulfúrico concentrado pueden atacar fácilmente al aluminio y a sus aleaciones, mientras que en soluciones de ácido nítrico, amoníaco y en la mayoría de ácidos orgánicos reaccionan ligeramente. La resistencia química del aluminio depende de la composición química y concentración de la solución así como de la pureza del metal. Por ejemplo, en ácido nítrico el aluminio de pureza 99,99% es mucho más resistente al ataque que el aluminio de pureza 99,5%.

Aleantes como el silicio o el zinc hasta un 1 % tienen un efecto muy débil sobre la resistencia a la corrosión, mientras que aleantes de elevado número atómico, como el cobre o el níquel, variaciones del 0,1%, afectan fuertemente a la resistencia.

Según el efecto que tienen los aleantes sobre la resistencia a la corrosión, éstos se pueden clasificar en:

- Elementos que mejoran la resistencia a la corrosión: cromo, magnesio y manganeso
- Elementos que empeoran la resistencia: cobre, hierro, níquel, estaño, plomo y cobalto
- Elementos que tienen poca influencia: silicio, titanio, zinc, antimonio, cadmio y circonio.

Materiales compuestos:

Los materiales compuestos, normalmente una matriz polimérica reforzada con fibras, se emplean con éxito en todo tipo de tamaños. El único problema reside en el coste relativamente elevado de los moldes, que sólo se amortizan cuando se fabrican series medias o grandes.

Los materiales compuestos son muy apropiados para la fabricación de palas de aeroturbinas. El conseguir la adecuada eficiencia aerodinámica de las palas de aeroturbinas supone el conseguir complicadas formas, sumamente esbeltas, de perfiles aerodinámicas con superficies externas muy lisas.

Por otro lado el conseguir la adecuada resistencia estructural de las palas para soportar las elevadas cargas producidas durante la vida en servicio de la máquina hace que se necesite palas de gran robustez y resistencia. El material compuesto de fibra de vidrio y poliéster conjuga unas características de resistencia elevadas con un mínimo peso y un coste reducido.

Otras características de estos materiales que les hace muy atractivos para palas es su versatilidad de formas de fabricación y la posibilidad de ser moldeados con las formas que se deseen, pudiéndose distribuir la resistencia y espesor de acuerdo a las exigencias del diseño.

Los materiales compuestos de fibra de vidrio tienen también como ventaja su bajo coeficiente de dilatación y conductividad eléctrica (buen comportamiento frente a rayos), transparencia a las ondas electromagnéticas (no producen interferencias de radio y TV).

En cuanto al comportamiento frente a la fatiga de los materiales compuestos, este es superior al de otros materiales convencionales, aunque no existen aun suficientes datos para conocer con todo detalle cual es su resistencia a fatiga sobre todo cuando se une además la acción de los agentes atmosféricos (agua, hielo, rayos U.V.).

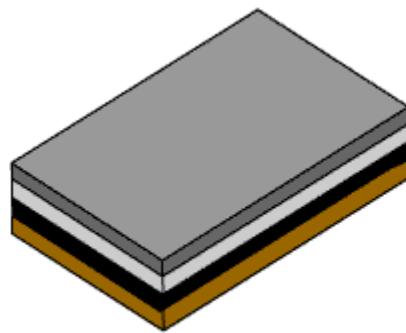
Entre los inconvenientes que tienen los materiales compuestos para la fabricación de palas están:

- materias primas todavía caras (excepto fibra de vidrio)
- necesitan procesos de fabricación no estándar
- comportamiento estructural no intuitivo
- falta de bases de datos fiables de características mecánicas
- control de calidad aún incipiente
- ¿anisotropía?

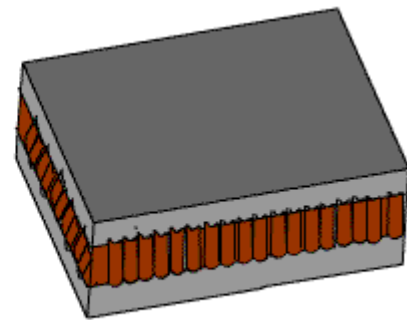
La forma de empleo estructural más comúnmente empleada para los materiales compuestos es como estructuras de pared delgada, ya sea en forma de "laminados" o "estratificados" (apilamiento de láminas delgadas fuertemente unidas entre ellas), o en forma de sándwich" (compuesto de un núcleo central de un material de espesor apreciable y baja densidad, con revestimientos relativamente delgados de láminas de material compuesto unidas al núcleo por ambos lados).

La forma de trabajo en los laminados de material compuesto es mediante esfuerzos contenidos en el plano (esfuerzos de membrana), o también algunas veces reaccionando cargas aplicadas perpendicularmente al plano del laminado (placa).

En el caso de estructuras sándwich, su forma de trabajo es similar a la de las vigas en 1, con las caras del revestimiento soportando las cargas axiales de tracción y compresión y el núcleo las cortantes.



LAMINADO



ESTRUCTURA SANDWICH

6.2.7.2.6.1 Ensayo de palas de rotor de aerogenerador

Las palas que son ensayadas a fatiga, sufren un proceso en el cual son ensayadas. Las palas son flexionadas utilizando un ciclo próximo a la frecuencia natural de la pala.

Cada pala es puesta en movimiento por un motor eléctrico montado sobre la pala que balancea un peso hacia arriba y hacia abajo. Las cimentaciones que soportan el casquillo de la pala deben ser muy sólidas: la cimentación de un gran casquillo de pala se compone de 2.000 toneladas de hormigón.

La finalidad de los ensayos en las palas de rotor es la de verificar que las laminaciones en la pala son seguras, es decir, que las capas de la pala no se separarán (delaminación). De la misma manera, los ensayos verifican que las fibras no se romperán bajo esfuerzos repetidos.

Galgas extensométricas (resistencias eléctricas planas pegadas a la superficie de la palas que están siendo ensayadas) se utilizan para medir de forma muy precisa la flexión y el alargamiento de las palas de rotor.

Las cámaras de infrarrojos se utilizan para revelar un aumento de calor local en la pala. Esto puede indicar, bien un área con humedecimiento estructural, es decir, un área donde el diseñador de la pala ha dispuesto, de forma deliberada, fibras que convierten la energía de flexión en calor con el fin de estabilizar la pala, o bien puede indicar un área de de laminación o un área que se está moviendo hacia el punto de rotura de las fibras.

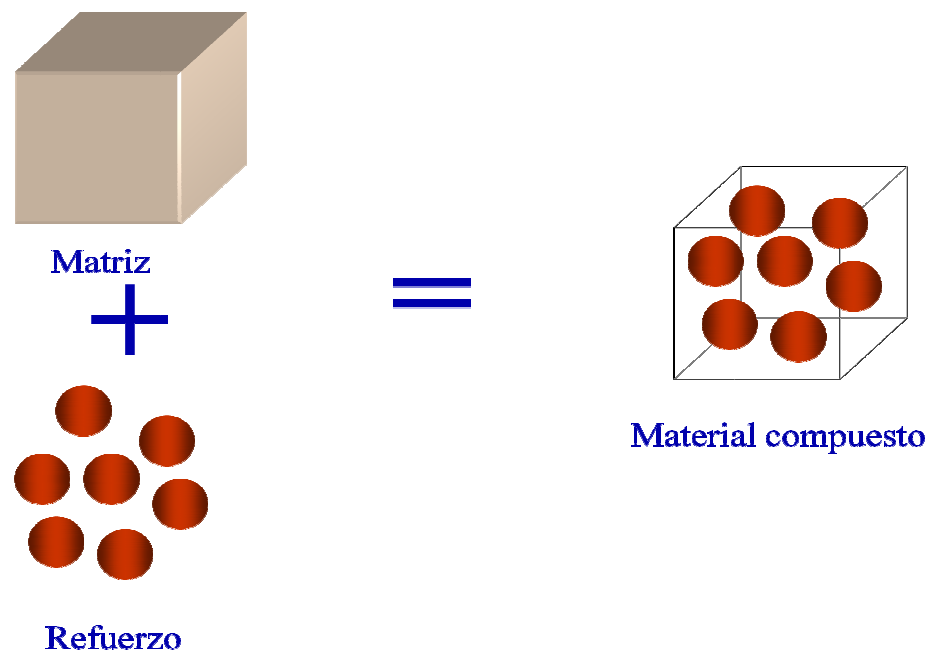
Las palas de rotor también pasan un ensayo de resistencia (y así su habilidad de soportan cargas extremas) mediante una sola flexión con una fuerza muy elevada. Este ensayo se realiza después de que las palas han sido sometidas al ensayo de fatiga, con el fin de verificar la resistencia de una pala que ha estado en operación durante un periodo de tiempo importante.

Debido a la gran utilización de los materiales compuestos en energía eólica, a continuación se hará una explicación detallada de este tipo de materiales.

6.3 Materiales compuestos

6.3.1 Definición de materiales compuestos

Un material compuesto es aquel formado por dos, o más, materiales distintos que presenta algunas propiedades físicas determinadas superiores a las de los materiales que lo constituyen.



Para el estudio de los materiales compuestos hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:^{viii}

- Material fabricado por el hombre
- No existe reacción química entre los componentes
- Material macroscópicamente heterogéneo
- Material “avanzado”

Como se ha dicho antes, el material compuesto presenta mejores características físicas o químicas que las que poseen sus materiales constituyentes por separado. Dentro de las propiedades de mayor interés ingenieril, que resultan mejoradas con estos materiales, se podría citar:

- Resistencia mecánica

- Rigidez
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Ligereza
- Resistencia a la fatiga
- Aislamiento térmico y acústico
- Diseño artístico

Los materiales compuestos pueden clasificarse en diferentes categorías:

- Materiales compuestos formados por una matriz reforzada con fibras/partículas de otro material distinto.
- Laminados compuestos que consisten en un conjunto de láminas de diferentes materiales unidas unas a otras.
- Materiales compuestos formados por una matriz reforzada con partículas de otro material diferente.

En la primera categoría de materiales compuestos que se acaba de citar, el uso de fibras viene motivado porque, desde los puntos de vista resistentes y de rigidez, una fibra de un material tiene unas propiedades mejores que el mismo material en forma de cuerpo.

La misión de las fibras es proporcionar al material compuesto las características de rigidez y resistencia necesarias, mientras que las misiones de la matriz son actuar como vehículo transmisor de fuerzas entre las fibras y proporcionar una configuración geométrica a las fibras.

Las funciones de la matriz en un material compuesto son las siguientes:

- Transmitir la fuerza entre las fibras
- Mantener las fibras en su posición
- Proteger a las fibras del medio ambiente

6.3.2 Clasificación de los materiales compuestos

A continuación se realizará una pequeña clasificación de las distintas topologías de los materiales compuestos, atendiendo a distintos aspectos. No se explicarán todas ellas debido a que en este proyecto, solamente hay un tipo de material compuesto que es interesante que se explicará más adelante.

Atendiendo al tipo de matriz

- **Matriz polimérica (PMCs)**

- Polímeros Termoestables (poliéster, epoxi, fenólica, ...)
- Polímeros Termoplásticos (polipropileno, poliamida, ...)
- **Matriz metálica (MMCs)**
 - Aleaciones de aluminio
 - Aleaciones de titanio
 - Aleaciones de cobre
- **Matriz cerámica (CMCs)**
 - Alúmina
 - Carburo de silicio
 - Nitruro de silicio

Como se puede ver en la Figura 26, actualmente, los materiales compuestos con mayor producción son los de matriz polimérica (PMCs).

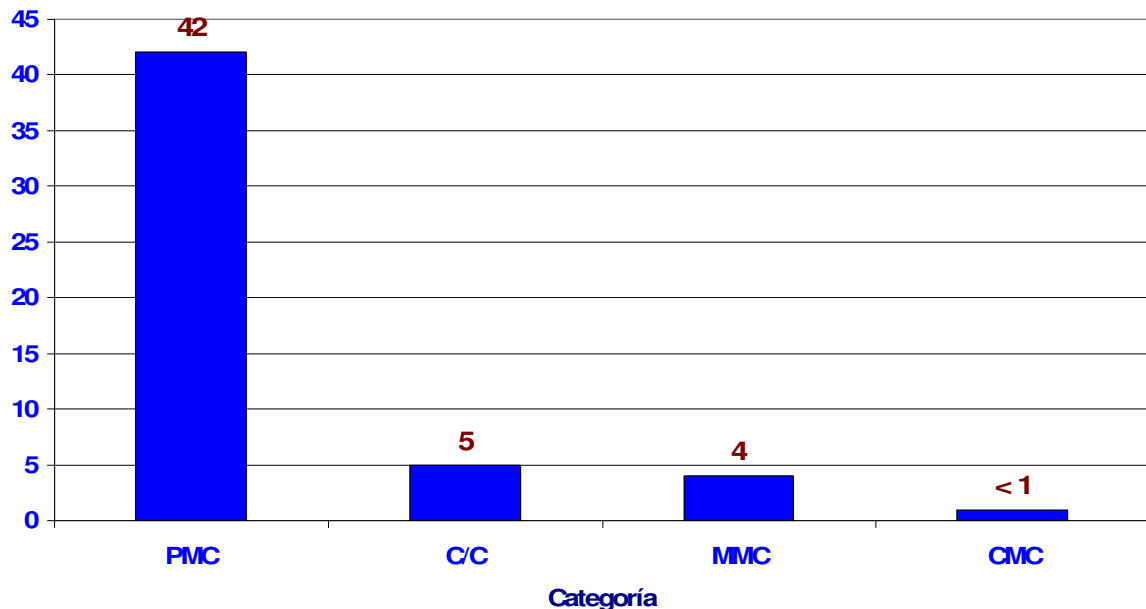


Figura 26: Producción anual Materiales compuestos avanzados

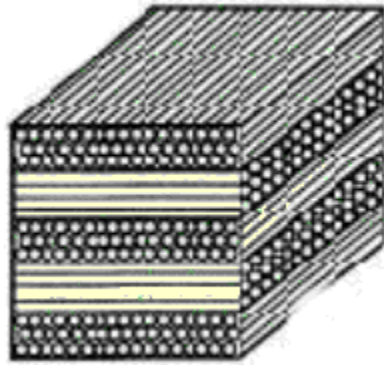
Atendiendo al refuerzos

Se puede distinguir **Refuerzo discontinuo**:

- Refuerzo por partículas
- Refuerzo por fibras cortas
- Refuerzo por plaquetas

Y Refuerzo continuo:

- Fibras largas :
 - Orientadas
 - Orientación aleatoria
- Tejidos
- Laminado



Como se ha podido leer anteriormente en el apartado Selección de materiales y tipos estructurales componentes, el material compuesto utilizado para los aerogeneradores de energía eólica, es la fibra de carbono con poliéster.

Del refuerzo por fibras se puede decir:

- El aumento de propiedades es modesto
- El comportamiento mecánico suele ser isótropo
- Son los materiales menos costosos y de más fácil fabricación de todos los materiales compuestos
- Partículas cerámicas incrementan la rigidez y la temperatura de servicio de las matrices metálicas
- Partículas dúctiles aumentan la tenacidad de fractura en matrices frágiles
- En los materiales cerámicos las partículas pueden incrementar diferentes propiedades mediante varios mecanismos (dureza, resistencia mecánica, tenacidad...)

Se diseñan materiales compuestos reforzados con fibras con la finalidad de conseguir elevada resistencia y rigidez a baja densidad. Estas características se expresan mediante los parámetros resistencia específica y módulos específico, que corresponden, respectivamente, a las relaciones entre resistencia y tracción y el peso específico y entre el módulo de elasticidad y el peso específico. Utilizando materiales de baja densidad, tanto para la matriz como para las fibras, se fabrican compuestos reforzados con fibras que tienen resistencia y módulos específicos excepcionalmente elevados.

Los materiales compuestos reforzados con fibras se subclasifican por la longitud de la fibra.

Se va a estudiar la fibra de carbono, debido a que es el refuerzo que se utiliza para la fabricación de distintos componentes del aerogenerador:

6.3.3 Fibra de carbono

Es la fibra con mejores propiedades mecánicas combinadas con una densidad baja

Propiedades:

- Altas propiedades mecánicas
- Material anisótropo
- Baja resistencia al impacto
- Gran estabilidad dimensional asociada a un coeficiente de dilatación muy bajo
- Conductividad térmica elevada
- Puede favorecer la corrosión galvánica
- Buena resistencia a la fatiga



6.3.4 Resina poliéster

Constituyen la familia más importante de las resinas termoestables utilizadas en la fabricación de materiales compuestos.

Sus propiedades son las siguientes:

- Gran capacidad para impregnar las fibras de vidrio
- Permite conseguir materiales compuestos con buenas propiedades mecánicas y gran ligereza
- Son productos inestables que requieren un almacenamiento controlado

Las resinas poliéster se obtienen mediante la policondensación de uno o varios glicoles con uno o varios diácidos donde por lo menos uno de ellos contiene el doble de enlace etilénico

7 Situación de la energía en los países en vías de desarrollo

Durante mucho tiempo no se le ha prestado la debida atención a la energía en el fomento del desarrollo sostenible en el ámbito internacional. Desempeña, sin embargo, un papel protagonista en los tres campos del desarrollo sostenible: social (lucha contra la pobreza), económico (seguridad del abastecimiento) y ambiental (protección del medio ambiente).

El sector de la energía posee una importancia fundamental dentro de la cooperación con los países en desarrollo, ya que problemas como, por ejemplo, el acceso limitado a las fuentes de energía, una utilización muy intensa de la biomasa tradicional y la dependencia de fuentes de energía importadas frenan considerablemente el desarrollo social y económico.

Hace poco que la energía se ha convertido en una fuente de preocupación internacional cada vez mayor. Esta comunicación fue la contribución de la Unión Europea a la Cumbre Mundial de Johannesburgo sobre Desarrollo Sostenible que tuvo lugar en agosto y septiembre de 2002 y en 2009 en la Cumbre Mundial en Copenhague sobre El Cambio Climático.

Análisis de la situación energética en los países en vías de desarrollo

La situación energética de los países en desarrollo es muy diversa.

Demanda de energía

El consumo de energía por habitante es claramente inferior al de los países industrializados. No obstante, el índice de crecimiento anual del consumo energético de los países en desarrollo es tres o cuatro veces superior al de los países industrializados. Estas cifras enmascaran el acceso muy desigual a la energía en el mundo. En África, el consumo por habitante sigue siendo muy pequeño, mientras que en Asia casi se ha duplicado desde 1970. De acuerdo con las tendencias actuales, tanto la demanda como la intensidad energética (la relación entre el consumo y el producto interior bruto) van a aumentar mucho en la mayoría de los países en desarrollo (en particular, en Asia). Esta situación hace que sea imprescindible tomar medidas como, por ejemplo, la creación de nuevas tecnología de desarrollo de fuentes de energía renovables y el aumento de la eficiencia energética.

Abastecimiento energético

Actualmente los países en desarrollo suelen utilizar más el carbón y algunas energías renovables (en concreto, la biomasa tradicional) que el petróleo, el gas o la energía nuclear. No obstante, la energía nuclear, el gas y el petróleo en particular están destinados a desempeñar un papel más importante en el futuro. El aumento del recurso al gas y el petróleo puede generar riesgos financieros, ya que el mercado internacional del petróleo es volátil y los recursos de ambos combustibles limitados. Seguramente se producirá en el futuro un descenso del uso de la biomasa. Hay que señalar que esta fuente de energía, que utilizan con frecuencia los países en desarrollo, entraña riesgos para el medio ambiente y la salud, causados en parte por su método de explotación.

Falta de financiación y de infraestructura reglamentaria e institucional.

La falta de financiación en el sector de la energía es un problema considerable en los países en desarrollo que no se resuelve únicamente con unos presupuestos públicos o la ayuda al desarrollo. Hay que atraer, por lo tanto, a los inversores privados. La situación es todavía más grave por la ausencia o la escasa definición de la política energética y la falta de capacidad institucional y de recursos humanos. No hay tampoco normas generales legislativas reglamentarias ni financieras adecuadas, las cuales son esenciales para atraer la financiación privada y garantizar el correcto funcionamiento del mercado.

Las energías renovables, actualmente se utilizan más en los países en desarrollo que en los países industrializados, pero suele tratarse de fuentes como la leña para calefacción, que entrañan un riesgo para el desarrollo sostenible (deforestación, por ejemplo) y la salud humana. Al contrario que en la Unión Europea, no hay una política específica de desarrollo de las energías renovables, que suelen resultar bastante caras en los países en desarrollo. Para apoyar el desarrollo de esas fuentes, hay que ayudar a los países a acceder a la tecnología, sostener la elaboración de unas normas jurídicas generales e introducir mecanismos financieros favorables. La asistencia técnica para garantizar la seguridad nuclear es uno de los temas prioritarios en el sector de la energía nuclear. Además de garantizar un nivel de seguridad elevado, podría contribuir a atraer las inversiones privadas a este sector.

7.1 Energía solar en países en vías de desarrollo

La energía solar puede ser vital para ayudar al desarrollo de regiones desfavorecidas del planeta y contribuir al equilibrio y la paz entre las naciones, el abaratamiento de esta tecnología será vital en este proceso.

Uno de los principales motivos por lo que el precio de los combustibles fósiles es muy alto es debido a la fuerte demanda de este tipo de material por parte de los países en vías de desarrollo, muchos de estos países no son productores de este tipo de combustible y deben de importarlos de países ya desarrollados. En muchas ocasiones estos países no tienen capacidad económica para afrontar una escalada de precios.

Otra desventaja que se hace patente en esta lamentable política económica de los países en desarrollo es la fuerte dependencia que se tiene de terceros países para la producción energética de un país, pilar fundamental para el desarrollo económico del mismo.

La decisión de los gobiernos de estos países en tomar como ejemplo de desarrollo energético a los países del primer mundo, es una decisión errónea, el constatar cuanto antes que el modelo energético actual basado en los combustibles fósiles es completamente insostenible y que la única salida viable es apostar fuerte y decididamente por el desarrollo de las energías renovables y en especial por la energía solar es solo una cuestión de tiempo, si los países en vías de desarrollo vieran este

camino una forma clara y tomaran la decisión de basar su desarrollo en torno a las soluciones que ofrecen las energías alternativas se conseguirían numerosas ventajas.

El desarrollo y la integración de esta energía es normalmente mucho más factible a la hora de integrarse en el desarrollo del país que las infraestructuras hasta ahora diseñadas esto se debe a que el diseño tradicional de las energías fósiles centralizan mucho la producción y para las necesidades de los países en desarrollo es mucho mejor la deslocalización de las energías renovables.

Las luchas por controlar los recursos energéticos y medio ambientales de los países ha sido la causa principal de las guerras en el siglo XX y el caso más reciente y palpable azota todos los días los medios de comunicación con trágicas noticias Irak, es penoso ver como los países desarrollados empeñan todos sus recursos en acaparar los bienes energéticos de otros países para poder perpetuar un modelo energético que tiene los días contados en vez de apostar fuerte por la energía solar que es un bien sin límite y asegurado por millones de años, fomentando la energía solar se eliminarían las guerras por los recursos energéticos, el equilibrio entre las naciones y las posibilidades de desarrollo de los países serian mucho más justas, se respetaría mucho mas al medio ambiente y el ser humano al ver directamente la causa y el efecto del consumo los recursos energéticos sería mucho más respetuoso con el medio ambiente.

7.2 Energía eólica en países en vías de desarrollo

Actualmente, la energía eólica no está muy presente en los países en vías de desarrollo debido a varios factores.

El sector eólica persigue:

- Incrementar la escala y el impacto del MDL (Mecanismo de desarrollo limpio) para que favorezca la evolución de los países en vías de desarrollo hacia una economía baja en carbono.
- Facilitar la implantación de la energía eólica en países en vías de desarrollo donde no existen incentivos suficientes.

8 Diseño de una instalación solar fotovoltaica

Lo primero que se debe hacer para llevar a cabo el diseño de una instalación solar fotovoltaica, es identificar todos los receptores que se conectarán a la instalación, así como una serie de valores de los mismos: Potencia o intensidad consumida y horas que estará conectado.

Seguidamente se debe obtener los siguientes valores:

- Total vatios.
- Total amperios.
- Total amperios/día.

Siempre se le debe aplicar un margen de seguridad, para compensar pérdidas en línea, suciedad de los módulos, rendimiento del inversor, etc. Por ejemplo se puede elegir un margen de seguridad del 15%.

A continuación que se debe realizar, es calcular la energía del panel. Para seguir con el cálculo es necesario conocer las horas pico solar (HPS) al cabo del día, varían según la zona, este dato se puede ver en cualquier página de materiales del sector.

Una vez que se conoce este valor, se necesita saber la intensidad máxima que puede suministrar el panel, este dato se tomará de las características del producto. Tras esto, será necesario calcular la energía pico (E_p):

$$E_p = I_p * HPS$$

Se debe realizar el cálculo del número de paneles, tan simple como dividir el consumo total del día con el que puede dar un panel:

$$N^{\circ} = \text{Consumo} / E_p$$

También se debe calcular la capacidad del sistema de acumulación.

El acumulador se dimensionará pensando en la autonomía de la instalación, pero si se producen periodos de días seguidos con radiación escasas, aparecerá un factor conocido como **días de autonomía**, que se define como la cantidad de días que es capaz el sistema de cubrir la demanda máxima. Este valor lo especifica el propio usuario, y dependerá de la zona y la época del año en la que se prevé funcione la instalación.

Por otro lado hay que conseguir que la profundidad de descarga no supere el máximo tolerable, para el tipo de acumulador elegido, esto debe venir especificado en las hojas de características técnicas del producto.

$$C = \frac{(\text{Consumo} * \text{días de autonomía})}{\text{Profundidad de descarga}}$$

9 Presupuesto instalación
energía solar fotovoltaica
Angola. Alimentación
estación de televisión

En Angola como en otros países en vías de desarrollo, no disponen de suministro eléctrico, y si disponen de él, es de muy baja calidad. Esto quiere decir, que disponen de una red cargada de fluctuaciones e incluso cortes de suministro.

Por ello, cuando se realiza un proyecto en un país de este tipo, hay que estudiar el estado de la red eléctrica. Normalmente en proyectos para estos países se deben de incluir una serie de elementos.

La estación de televisión a alimentar constará de una serie de componentes:

- Transmisor TTV 100W
- Otros elementos.
- IRD profesional.

El transmisor TTV es propiamente el equipo que transmitirá la señal de televisión. Entre los otros elementos podemos encontrar el GPS, unidad de supervisión, etc. El IRD es un equipo que permite recibir la señal de video a transmitir desde la red de distribución que en este caso es desde el satélite. Permite transformar la señal digital del satélite en señal analógica, que será la que se transmita.

El cliente de esta instalación es TELEVISAO PUBLICA DE ANGOLA.

Para poder llevar a cabo el estudio de la instalación

Tabla 4: consumos equipos estación televisión Luanda, debemos de conocer los consumos de todos los elementos de dicha estación de televisión.

Descripción	Cant.	Potencia W	Utilización	Consumo Wh/día
Transmisor TTV 100W	1	583	24h/día	13992 Wh/día
Otros	1	300	10h/día	3000 Wh/día
IRD profesional (50W max)	1	50	24h/día	1200 Wh/día
			TOTAL	18192 Wh/día

En la Tabla 4, aparecen los consumos de cada uno de los elementos de la estación de televisión, su utilización en h/día y su consumo en Wh/día. Con esto se puede comenzar a hacer el cálculo de la instalación solar fotovoltaica.

La tensión de trabajo del equipo de emisión es de 48Vcc, el valor de esta tensión es necesario para obtener el consumo total en amperios hora/día:

$$\text{Consumo total} = 18192/48 = 379.00 \text{ Ah/día}$$

Como se ha dicho en la explicación del diseño de una instalación de energía solar fotovoltaica, se debe aplicar un incremento como margen de seguridad para compensar pérdidas en línea, suciedad de los módulos, rendimiento del inversor, etc., en este caso se ha elegido un incremento del 15%, por tanto:

$$\text{Consumo total: } 379,00 \text{ Ah/día} \times 1,15 = 435,85 \text{ Ah/día}$$

Hay que tener en cuenta los datos de radiación, estos dependen del lugar donde esté colocada la instalación. En este caso los datos han sido obtenidos en el libro "INTERNATIONAL H-WORLD DATABASE", se tiene que para una inclinación de 30° sobre la horizontal, la media de radiación de los meses más desfavorables es de:

13.680Kj/m^2 lo que equivale a 3,80 horas de sol de pico (h.s.p.)

El siguiente paso, como ya se explicó en el apartado anterior, es el cálculo del número de módulos. Se ha utilizado el modelo A-120 de 120 Wpico y 7,10A de corriente media de carga, se tendrá:

Nº de módulos en paralelo = $435,85 / 26,98 = 16,15$, por lo tanto, serán necesarios un total de 17 módulos.

Al ser la tensión de trabajo 48Vcc, se deberá instalar 4 series de 17 módulos, cada uno de ellos entrega una tensión de 12V.

En total se necesitan 68 módulos.

Otro de los pasos es calcular el acumulador

Días de autonomía = 3

Profundidad de descarga = 60%

Capacidad = (consumo x días de autonomía) / profundidad de descarga

Capacidad = 2179,25Ah

Utilizaremos la batería estacionaria marca TUDOR, modelo 16OPZV2300 de 2300Ah (vasos de 2V) en 100 horas de descarga.

El siguiente paso será calcular el regulador y elegir el modelo que mejor convenga a las especificaciones necesarias:

Amperios a regular = Nº de módulos en paralelo x Intensidad del panel
 $17 \text{ módulo} \times 7,10 = 120,7\text{A}$

Utilizaremos 1 regulador tipo serie marca ATERSA modelo LEO-3 150/50 48 de 125A, a 48V.

A continuación se ha realizado la estimación del presupuesto de la instalación solar fotovoltaica, teniendo en cuenta los componentes que se han calculado anteriormente:

Item	Cantidad	Denominación	Precio unitario	Importe total
1	68	Módulo solar fotovoltaico de silicio monocristalino, marca ATERSA, modelo A-120, de 120Wpico y de 7,1A de corriente media de carga. Potencia pico instalada ...Wp	460,00	31.280,00
2	4	Batería estacionaria compuesta por 6 vasos de 2 V, marca TUDOR, modelo 8OPZV960 de 960Ah en 100 horas de descarga.	16.780,00	67.120,00
3	1	Regulador de carga marca ATERSA, modelo LEO-3 150/50 48 de125A,a 48V,con tecnología digital, equipado con voltímetro y amperímetro de entrada y salida, sonda de temperatura interna y corrección automática de niveles de carga	1.250,00	1.250,00
4	17	Estructura soporte de acero galvanizado, marca ATERSA, modelo SA-120/4, para 4 Módulos e instalación sobre losa o dado de hormigón	290,00	4.930,00
5	1	Inversor de onda senoidal 300W (supsonik)	766,00	766,00
6	1	caja interconexión (approx)	125,00	125,00
6	1	materiales interconexión (approx)	900,00	900,00
6	1	Cargador de baterías Zigor (20A)	1.100,00	1.100,00
			Sub-total	107.471,00
			Margen 0,6	71.647,69
			TOTAL Euros	179.118,69

Podemos comparar esta instalación con la que se haría en el caso de no usar energía solar fotovoltaica. Como se dijo anteriormente, en los países en vías de desarrollo es necesario asegurarse de poder disponer de una fuente de energía eléctrica debido a la precariedad de la situación. Normalmente lo que se hace en proyectos en estos países es usar una serie de elementos:

Grupos electrógenos: Se usa como alternativa energética en caso de emergencias, en industrias o residencias, cuando la red principal de abastecimiento eléctrico no está disponible.

UPS: Un UPS es una fuente de suministro eléctrico que posee una batería con el fin de seguir dando energía a un dispositivo en el caso de interrupción eléctrica. Los UPS son llamados en español SAI (Sistema de alimentación ininterrumpida).

AVR: Automatic Voltage Regulator (Regulador automático de voltaje): dispositivo de hardware empleado para mantener un voltaje específico en dispositivos electrónicos.

A continuación se expone un presupuesto estimativo de una instalación formada por un grupo electrógeno, un SAI y una AVR.

Denominación	Modelo	Precio
Grupo electrógeno (Himoinsa)	HIW 40	5.806,25
SAI (Salicru)	EMi T-27-3 (+/-20%)	3.105,00
AVR (Salicru)	UPS – 15 – CUBE-STR (3x380+N/3x380+N)	4324,50
	Total instalación	13.235,75

10 Conclusión

Uno de los objetivos que se han estudiado en este proyecto final de carrera, es la implantación de energías renovables en un sistema de generación eléctrica en países en vías de desarrollo.

En estos países el acceso a las fuentes de energía es muy limitado, tanto que a veces no disponen siquiera de luz. Por ello es importante el uso de energías renovables.

Durante el proyecto se han estudiado dos de las energías renovables más famosas hasta el momento, la energía eólica y la energía solar fotovoltaica.

Se ha elegido la energía fotovoltaica frente a la energía eólica por diversos factores:

- El aire al ser un fluido de pequeño peso específico, implica fabricar máquinas grandes y en consecuencia caras. Su altura puede igualar a la de un edificio de diez o más plantas, en tanto que la envergadura total de sus aspas alcanza la veintena de metros, lo cual encarece su producción.
- Desde el punto de vista estético, la energía eólica produce un impacto visual inevitable, ya que por sus características precisa unos emplazamientos que normalmente resultan ser los que más evidencian la presencia de las máquinas (cerros, colinas, litoral). En este sentido, la implantación de la energía eólica a gran escala, puede producir una alteración clara sobre el paisaje, que deberá ser evaluada en función de la situación previa existente en cada localización.
- Un impacto negativo es el ruido producido por el giro del rotor, pero su efecto no es más acusado que el generado por una instalación de tipo industrial de similar entidad, y siempre que estemos muy próximos a los molinos.
- También ha de tenerse especial cuidado a la hora de seleccionar un parque si en las inmediaciones habitan aves, por el riesgo mortandad al impactar con las palas, aunque existen soluciones al respecto como pintar en colores llamativos las palas, situar los molinos adecuadamente dejando "pasillos" a las aves, e, incluso en casos extremos hacer un seguimiento de las aves por radar llegando a parar las turbinas para evitar las colisiones.
- El transporte de las torres es un factor limitante, debido a que suelen medir entre 20-30 metros y suelen pesar entre 40-80Tm. El transporte suele ser por carretera.

En resumen, la energía fotovoltaica es generada directamente del sol, por lo tanto su rendimiento en Angola sería mayor que si se eligiera energía eólica.

Con lo cual, en un país como Angola será más sencillo realizar una instalación fotovoltaica que una instalación eólica.

Por otro lado se puede comparar los presupuestos realizados, el primero es una instalación realizada con energía solar fotovoltaica y el segundo una instalación con alimentación normal.

Si se comparan ambos presupuestos, se confinar la desventaja del coste, es decir, para realizar una instalación solar fotovoltaica, además de un gran terreno donde poder instalar los paneles solares, se necesita una gran inversión. Posiblemente este sea el punto en el que los países en vías de desarrollo tengas más problemas a la hora de decidir si instalar o no paneles solares, pero teniendo en cuenta la precariedad de la red eléctrica existente, es una decisión acertada instalar energía solar fotovoltaica.

Otro de los factores que se puede destacar sobre la elección de la energía solar como fuente de energía para realizar la alimentación del sistema que se ha estudiado en este proyecto, es la creación de empleo. Una instalación convencional no necesita tanto mantenimiento, pero por otro lado, la instalación fotovoltaica si necesita un mantenimiento, por ello, se crea puestos de trabajo, personas que realizarán este mantenimiento. El empleo, es un punto a destacar para estos países en vías de desarrollo.

11 Bibliografía

ⁱ Fernández Salgado, José M^a (2009), *Tecnologías de las energías renovables*, A: Madrid Vicente, Mundi-Prensa 2009

ⁱⁱ www.quimica.urv.es (última visita 14 Enero 2010)

ⁱⁱⁱ William D Callister Jr, (1995), *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, Editorial Reverte, S.A

^{iv} Fernández Salgado, José M, *Guía completa de energía solar fotovoltaica*, A, Madrid Vicente, Ediciones 2007

^v Madrid, A, *Energías renovables (Fundamentos, tecnologías y aplicaciones)*, Madrid: AMV, Ediciones : Mundi-Prensa 2009

^{vi} Ministerio de ciencia y tecnología Ciemet, *Principio de conversión de la energía eólica*

^{vii} <http://www.arghys.com/construccion/acero-caracteristicas.html> (última visita 10 Enero 2010)

^{viii} Barbero, Enrique & Zaera Polo, Ramón & Navarro, Carlos (2007), *Materiales compuestos (Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras, Universidad Carlos III, Madrid)*